

Resonanssiputkeen ääntämisen vaikutus kurkunpään ääntöväylän suhteelliseen pinta-  
alaan ja äänihuulten kontaktiasteeseen

Pro gradu -tutkielma

Puheen ja äänen tutkimuksen la-  
boratorio

Puhetekniikka ja vokologia

Kasvatustieteiden yksikkö

Tampereen yliopisto

Joanna Peltokoski

13.6.2013

Tampereen yliopisto  
Kasvatustieteiden yksikkö  
PELTOKOSKI JOANNA  
Resonanssiputkeen ääntämisen vaikutus kurkunpään ääntöväylän suhteelliseen pinta-alaan ja ääni-  
huulten kontaktiasteeseen  
Pro gradu -tutkielma 60 s.  
Puhetekniikka ja vokologia  
Kesäkuu 2013

## Tiivistelmä

Resonanssiputkia käytetään sekä ääniterapiassa että puhetekniikan harjoituksissa. Tässä tutkimuksessa selvitettiin kurkunpään ääntöväylän koon ja äänihuulikontaktin tiiviyn muutosputkiään-  
nön aikana verrattuna vokaaliääntöön.

Seitsemän terveäänistä naista, joilla oli kaikilla kokemusta putken avulla harjoittelemisesta, tuotti ensin vokaaliääntöä ja jatkoi sitten tekemällä ääntöä 27 cm pitkään resonanssiputkeen (sisähalkaisija 8 mm, ulkohalkaisija 9 mm) siten, että putken pää oli joko ilmassa tai 2 cm:n syvyydessä vesimukissa. Näytteistä nauhoitettiin nasofiberoskopiavideo ja elektroglossografia EGG. Kolme tutkijaa mittasi suhteellisen muutoksen kurkunpään ääntöväylän suuaukon pinta-alassa. Alueen rajoina toimi edessä kurkunkansi, sivuilla kurkunkansipoimut ja takana kannurustot. Kontaktiaste (CQ, äänihuulten kontaktiaika jaettuna koko periodin pituudella) onnistuttiin mittaamaan kuudelta henkilöltä, tosin kahdelta henkilöltä vain osaksi.

Ilmaan tehdyn resonanssiputkiään-  
nön aikana kurkunpään ääntöväylä kaventui keskimäärin 21 % ja veteen tehdyn putkiään-  
nön aikana keskimäärin 65 % verrattuna vokaaliääntöön. CQ kasvoi kaikilla osallistujilla ilmaan tehdyn putkiään-  
nön aikana verrattuna vokaaliääntöön. Veteen tehdyssä putkiään-  
nössä CQ laski yhdellä henkilöllä ja yhdellä pysyi samana.

Tulosten perusteella näyttää siltä, että ääntöväylän kasvanut impedanssi saa aikaan kurkunpään ään-  
töväylän kaventumisen ja lisääntyneen kontaktin äänihuulten välillä. Vedessä pidetty resonanssi-  
putki sai aikaan voimakkaamman kaventuman kuin ilmassa pidetty. Siis mitä suurempi impedanssi  
ääntöväylässä on, sitä kapeammaksi kurkunpään ääntöväylä näyttäisi muodostuvan. CQ:ssa esiintyi  
variaatiota veteen ääntämisen yhteydessä.

Impedanssin määrän lisäksi myös henkilön harjaantuneisuus putken käytössä näyttäisi vaikuttavan  
kurkunpään ääntöväylän kaventumiseen. Kaventuma oli voimakkaampi niillä osallistujilla, joilla oli  
enemmän kokemusta putken käyttämisestä. Impedanssin kasvu (vesivastus) sai kuitenkin aikaan  
sen, että myös hieman kokemattomammilla osallistujilla näkyi selkeä muutos kurkunpään ääntö-  
väylän koossa. Aihe vaatii lisätutkimusta, mutta impedanssin määrän vaikutus voisi olla hyvä ottaa  
huomioon esimerkiksi puhetekniikan opetuksessa ja ääniterapiassa, kun valitaan aloittelijalle sopi-  
vaa putken tai pillin kokoa.

Asiasanat: *ääniharjoittelu, ääniterapia, resonanssiputkiharjoittelu, elektroglossografia, EGG, kon-  
taktiaste, CQ, nasofiberoskopia, impedanssi, inertanssi*

## **Immediate effects of resonance tube training on epilaryngeal area and vocal fold vibration shown in nasal fiberoscopy and electroglottography**

### **Abstract**

Phonation into a resonance tube has been used in voice training and therapy. This study investigated the supraglottal area and vocal fold vibration in resonance tube voicing compared to vowel phonation.

Seven female participants produced vowel phonation and then continued on phonating into the resonance tube (27 cm in length, 8 mm inner diameter, 9 mm outer) with the outer end of it being either in the air or submerged 2 cm under water surface in a mug. Nasal fiberoscopy and electroglottogram (EGG) were recorded. Three researchers measured the relative changes in the epilaryngeal area, in this case the space between arytenoids, aryepiglottic folds and epiglottis. Contact quotient (CQ, closed time divided by period time) was possible to measure from EGG-signals for 6 subjects but only in partial for two subjects.

During resonance tube voicing the epilaryngeal area diminished (in average 21 % with the outer end of the tube in the air and 65 % with the end in water). CQ increased for all participants when the tube was held in air but when it was in water, CQ increased for three, decreased for one and stayed the same for one subject.

Increased vocal tract impedance seemed to result in narrowing of the epilaryngeal space and firmer adduction between the vocal folds. The effect in epilaryngeal space was stronger with higher resistance (tube in water), but such systematic difference was not found in the change of CQ because there was some variation in it when the tube was held in water.

The results suggest also that the more experience a person has in training with tubes, the more prominent the narrowing will be. When the impedance of the vocal tract is sufficiently increased, the narrowing will appear also for those who have less experience. This might be a useful thing to consider in voice training and therapy when appropriate tube is being chosen.

**Key words:** *Voice training and therapy, resonance tube training, electroglottography, EGG, contact quotient, CQ, nasal fiberoscopy, nasofiberoscopy, impedance, inertance*

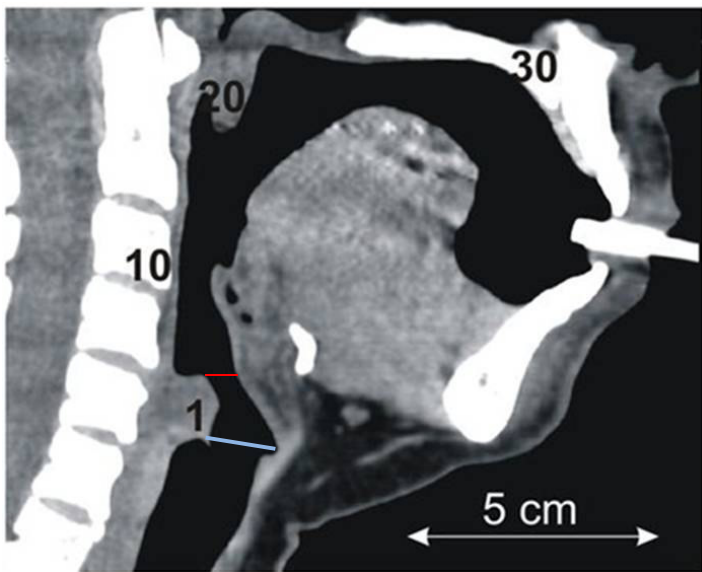
# Sisällys

Tiivistelmä .....	2
Abstract .....	3
Sisällys .....	4
1 Johdanto .....	6
2 Kirjallisuus .....	8
2.1 Itsestään ylläpysyvä äänihuulivärähtely .....	8
2.2 Ääntöväylän kavennusten ja pidennysten käyttö ääniharjoittelussa .....	8
2.3 Ääntöväylän pidentäminen putken avulla .....	10
2.3.1 Resonanssiputki .....	10
2.3.2 Harjoittelemisen putkien avulla.....	11
2.3.3 Harjoittelun vaikutukset: tuloksia aiemmista tutkimuksista .....	13
2.4 Kurkunpään ääntöväylä eli epilaryngaaliputki.....	16
2.4.1 Anatomia.....	16
2.4.2 Kurkunpään ääntöväylän kaventuminen .....	18
2.4.3 Kurkunpään ääntöväylän kavennus eri laulutyyeissä .....	19
2.5 Impedanssi.....	20
2.5.1 Impedanssi, reaktanssi, inertanssi – käsitteiden määrittelyä.....	20
2.5.2 Akustinen impedanssi putkiharjoittelussa.....	21
2.6 Nasofiberoskopia.....	23
2.7 Äänihuulikontaktin tiiviiden mittaaminen.....	25
2.7.1 Elektroglottografia .....	25
2.7.2 Kontaktiaste CQ.....	26
2.7.3 Kontaktiaste putkiharjoittelussa.....	28
3 Tutkimuskysymykset .....	31

4	Tutkimusmenetelmät ja osallistujat .....	32
4.1	Osallistujat.....	32
4.2	Näytteet .....	32
4.3	Kurkunpään kuvantaminen.....	33
4.4	Äänihuulten kontaktiasteen (CQ) mittaaminen.....	33
4.5	Kurkunpään ääntöväylän koon mittaaminen.....	34
4.6	Mittausvirheen arviointi .....	36
4.7	Taulukot.....	36
5	Tulokset.....	37
5.1	Kurkunpään ääntöväylän pinta-ala.....	37
5.2	Kontaktiasteen muutokset .....	41
5.3	Mittautulosten virhemarginaali.....	42
6	Pohdinta .....	44
6.1	Osallistujien ja yksilöllisten tekijöiden vaikutukset.....	44
6.2	Kaventuma kurkunpään ääntöväylässä .....	45
6.3	Mitä kontaktiaste kertoo putkiharjoittelun vaikutuksista? .....	47
6.4	Koeasetelman rajoitukset .....	48
6.5	Muut putkitutkimukset – vertailtavuus ja yleistettävyys.....	49
7	Johtopäätökset.....	52
	Kirjallisuus .....	53

## 1 Johdanto

Putkia ja puolisolkuja, joissa tehdään kaventuma jonnekin ylemmäksi ääntöväylässä, on käytetty jo pitkään ääniharjoittelussa ja -terapiassa. Viime vuosina on alettu kiinnittää enemmän huomiota siihen, miksi nämä harjoitukset ovat niin suosittuja. Moni puhetekniikan opettaja ja harjoituksia tehnyt tietää näiden harjoitteiden toimivan, mutta he eivät osaa varmuudella kuvata, millaisia muutoksia ne aiheuttavat ääntöväylässä. Tähän mennessä saatujen tutkimustulosten mukaan ääntöväylän pidentykset ja kavennukset edistäisivät äänihuulivärähtelyä, kun kasvanut ääntöväylän vastus muokkaa äänen akustisia olosuhteita. Kasvanut ääntöväylän vastus madaltaa äännön kynnyspainetta, muokkaa äänihuulten virtauspulssia ja vaikuttaa äänihuulten värähtelytapaan positiivisella tavalla (ks. Fant & Lin 1987; Titze 1988a; Titze & Story 1997; Titze 2006b; Story, Laukkanen & Titze 2000). Lisäksi puolisolku- ja putkiharjoitukset voivat muokata formanttien sijoittumista taajuusasteikolla siten, että ääneen muodostuu puhujan- tai laulajan formantti. Putki- ja puolisolkuharjoituksilla saavutetut hyödyt näyttäisivät säilyvän myös harjoittelun jälkeen tuotetuissa vokaaliäännöissä. Yksi esitetty oletus on, että ääntöväylän pidentäminen tai kaventaminen saisi aikaan myös *kurkunpään ääntöväylän eli epilaryngaaliputken* (ks. kuva 1) kaventumisen. Ajatuksena on, että kun putken tai puolisolun avulla on saatu ääntöväylä avustamaan äänihuulivärähtelyä, sama tunne halutaan saavuttaa myös tavallisessa äänentuotossa. Tämä olisi mahdollista kavennetun kurkunpään ääntöväylän avulla. Kurkunpään ääntöväylän kaventumisen johdosta sen ja yläpuolella olevan nielun suhteellinen kokoero kasvaa, ja tämä kokoero auttaa saavuttamaan tehokkaan ja taloudellisen äänentuottotavan (Titze 2006a; b.)



**Kuva 1.** Kurkunpään ääntöväylällä tai epilaryngaaliputkella tarkoitetaan kuvassa sinisen ja punaisen viivan väliin jäävää aluetta. Se käsittää äänihuulten yläpuolisesta tilasta taskuontelot, taskuhuulet ja kurkunpään eteisontelon eli vestibulan. Sininen viiva kuvastaa äänihuulia, punainen viiva on kurkunpään ääntöväylä suuaukko. Viivat ovat arvioita. (Alkuperäinen kuva Vampola ym. 2011).

Kurkunpään ääntöväylän kaventuminen voi siis tuoda lisähyödyn sen lisäksi, että pidennetty tai kavennettu ääntöväylä jo itsessään vaikuttaa positiivisella tavalla äänenlaatuun ja muokkaa äänen-tuottotapaa taloudellisemmaksi (Titze & Laukkanen 2007). Vampolan, Laukkasen, Horáčekin ja Švecin (2011), Laukkasen, Horáčekin, Krupan ja Švecin (2012b) yhdellä tutkittavalla toteutetuissa tutkimuksissa todettiin kuitenkin, ettei kaventumaa kurkunpään ääntöväylässä ollut havaittavissa putkeen ääntämisen aikana eikä sen jälkeen. Guzmanin, Laukkasen, Krupan, Horáčekin, Švecin ja Geneidin (2013) tutkimuksessa taas kurkunpään ääntöväylä laajeni tutkittavana toimineella mies-laulajalla putkeen ääntämisen aikana mutta kapeni hieman putkeen ääntämisen jälkeen. Näin ollen tarkoituksena onkin nyt tutkia useamman naiskoehenkilön ja puheenkoulutustraditiota edustavan tutkittavan avulla, tapahtuuko kurkunpään ääntöväylässä kaventumista putkiäännössä verrattuna vokaaliääntöön ja miten putkeen ääntäminen vaikuttaa äänihuulten kontaktin suhteelliseen määrään.

Tutkimuksen aikana pyrin määrittämään prosentuaalisen luvun kurkunpään ääntöväylän pinta-alan mahdolliselle muutokselle, joka voisi sitä myöten kuvata ja selittää putkiharjoittelussa tapahtuvaa ilmiötä. Äännoistä tarkastellaan myös äänihuulten kontaktiastetta, jonka mittaamisen tarkoituksena on kartoittaa äänihuulikontaktin määrän muutoksia vokaaliäännön ja putkiäännön välillä.

## 2 Kirjallisuus

### 2.1 Itsestään ylläpysyvä äänihuulivärähtely

Äänihuulivärähtely eli ilmanpaineen pilkkoutuminen tapahtuu ilman virratessa periodisesti avautuvan ja sulkeutuvan ääniraon läpi samalla kun äänihuulet ovat sopivasti lähennettynä. Tämä saavutetaan lisäämällä äänihuulia lähentävien lihasten aktiviteettia. Kun äänihuulet ovat sopivasti lähennettyinä, ja ilmaa virtaa äänihuulten välistä, äänihuulet alkavat värähdellä. (Titze 2000, 125.) Äänihuulivärähtelyä on selitetty yleisesti Bernoullin efektin avulla: kaasu- tai nestemolekyylien virtaus kiihtyy kapeikossa, tässä tapauksessa ääniraossa, aiheuttaen perässään alipaineen, ja tämä imu vetää äänihuulet yhteen. Äänihuulten ollessa lähennettyinä painetta alkaa kertyä äänihuulten alapuolelle, ja kun paine kasvaa tarpeeksi suureksi, äänihuulet loittonevat toisistaan, jolloin ilma alkaa taas virrata kiihtyvällä vauhdilla ääniraon lävitse. Tämä tapahtuu useita satoja kertoja sekunnissa äännön aikana. (Titze 2000, 87–89.)

Äänihuulivärähtelyn aikaansaamiseksi tarvitaan sopiva suhde virtauksen ja äänihuulia lähentävien lihasten välille. Ääniraon ylä- tai alapuolella olevat ääniväylän osat voivat myös auttaa äänihuulten värähtelyä siten, että äänivärähtely jatkuu pidempään, vaikka virtaus tai adduktion määrä ei kasvaisikaan. Perinteisen Bernoullin efektin lisäksi huomio kohdistuu ääniraon yläpuolisessa tilassa sijaitsevaan paineeseen ja viiveellä tapahtuviin vaikutuksiin. Kun äänirako on avautumassa, äänihuulten välistä alkaa ilmavirtaus, ja se työntää ääniraon yläpuolella olevaa ilmapatsasta, jolloin myös ilmapatsaan vauhti kiihtyy. Näin ääniraon yläpuolelle syntyy positiivinen paine, joka auttaa työntämään äänihuulet erilleen. Kun äänirako on sulkeutumassa, ääniraon yläpuolinen ilmapatsas jatkaa kulkuaan ylöspäin, mutta ääniraossa sillä hetkellä sijaitsevan ilmapatsaan vauhti ei enää pysy sen mukana. Tällöin äänihuulten yläpuolelle syntyy negatiivinen paine, joka vetää äänihuulet taas yhteen. (Titze 2000, 93.)

### 2.2 Ääntöväylän kavennusten ja pidennysten käyttö ääniharjoittelussa

Ääniharjoitusmetodeja voidaan jaotella muun muassa sen mukaan, mitä periaatteita ne noudattavat. Osassa harjoitellaan kaikkia äänen muodostamiseen tarvittavia osioita erikseen (esim. Cooper 1985), ja osa pyrkii vapauttamaan ihmisessä ”jo sisäsyntyisenä olevan luonnollisen ja hyvän äänen” (esim. Linklater 1976). Joissain harjoitteissa pyritään puolestaan *ääntöbalanssin*, eli optimaalisen äänihuulikontaktin tiiviydyn, löytymiseen. Ääntöbalanssin löytyessä ääni ei ole kireä eikä vuotoinen, vaan kiinteä mutta silti mahdollisimman taloudellisesti tuotettu (ks. esim. Laukkanen 1992a;



b). Yhteistä näille erilaisille ääniharjoituksille ja -harjoitussarjoille on kuitenkin se, että monessa niistä käytetään harjoituksissa hyväksi ääntöväylään muodostettavia sulkua tai kaventumia, kuten frikatiiveja ja nasaaleja, sekä ääntöväylän pidentyksiä, kuten putkia. Nämä harjoitukset ovat suosittuja, sillä harjoituksia tehneet henkilöt kokevat, että äänenvoimakkuus kasvaisi, äänestä tulisi vahvempi ja selkeämpi, ja että äänentuotto helpottuisi harjoittelun myötä. (Laukkanen 1995, 30; Bele 2005; Sampaio, Oliveira & Behlau 2008.) Aiemmissa tutkimuksissa on todettu näiden harjoitusten lisäävän muun muassa äänenpainetasoa (Laukkanen 1992a; b; Vampola ym. 2011).

Lisäämällä ääntöväylän vastusta esimerkiksi ääntöväylää pidentämällä tai kaventamalla saadaan vaikutettua äänihuulten värähtelytapaan ja ääniraon virtauspulssiin niin, että värähtely pysyy yllä ilman jatkuvaa energian lisäystä (Fant & Lin 1987; Story ym. 2000). Kavennus voidaan tehdä esimerkiksi suuontelossa kielen, hampaiden tai huulien avulla, mutta tällöin myös äänenvoimakkuus saattaa olla matalampi. Kapeampi väylä nimittäin laskee ensimmäisen formantin taajuutta ja madaltaa äänen intensiteettiä. Tämä voidaan havaita esimerkiksi eri vokaalien voimakkuuksissa: väljillä vokaaleilla (esimerkiksi /a/ ) on suurempi SPL kuin suppeilla (esimerkiksi /y/). (Fant 1970, 58.) Vaikutukset artikulaatioon poistuisivat, jos kaventuma saataisiin muodostettua alemmaksi ääntöväylään. Kurkunpään ääntöväylän kaventaminen pitäisi yllä sopivan ääniraon yläpuolisen paineen madaltamatta äänenpainetasoa tai vaikuttamatta artikulaatioon (Titze & Story 1997; Titze 2004; 2006; Bele 2005). Näin äänirako ei olisi ainoa kaventumakohta ääniväylässä, vaan kaventumaa jatketaan kaventamalla kurkunpään ääntöväylää. Tämä keino on käytössä eri laulutyyplejä tuotettaessa, kuten twangissa, oopperalaulussa ja belttauksessa. (Sundberg 1974; Yanagisawa ym. 1989; Titze & Story 1997.)

## 2.3 Ääntöväylän pidentäminen putken avulla

### 2.3.1 Resonanssiputki

Putkien käytöllä on ääniharjoittelussa pitkät perinteet. Ensimmäiset maininnat putken käytöstä on vuodelta 1904, jolloin Spiess esitteli niiden käytön yhdessä nasaaliäänten [m] kanssa. Putki toimi kuitenkin lähinnä apuvälineenä parempaa nasaaliharjoitustekniikkaa opeteltaessa: se asetettiin kielen päälle noin puoleen väliin ja tarkoituksena oli, että nasaaliharjoitteet tehostuisivat putken ollessa suussa. Putken tarkoituksena oli auttaa tekemään harjoitus oikealla asetuksilla siten, että ilmanpaineen ja virtauksen suhde on juuri sopiva. Putken ollessa suussa henkilö voi myös jatkaa äänentuottoa, vaikka sieraimet äkkiä suljettaisiin. (Spiess 1904.) Myöhemmin putkia on alettu käyttää erityisesti Suomessa omana harjoitusmenetelmänä.

Ääniharjoittelussa käytettäviä putkia on olemassa eripituisia ja eri materiaaleista tehtyjä. Tässä tutkimuksessa käytettiin Antti Sovijärven kehittämää lasiputkea, jota hän itse nimitti resonaattoriputkeksi. Sovijärvi alkoi käyttää lasiputkia ja vesivastusta 1960-luvulta lähtien aluksi hypernasaalisuuden poistamiseksi. Hieman sen jälkeen hän alkoi käyttää menetelmää myös ääniterapia-asiakkaille ja myöhemmin myös laulajien harjoituksissa. (Sovijärvi 1969).

Erilaisten ääniharjoittelussa käytettävien putkien kehittäjillä on omat ajatuksensa siitä, kuinka pitkä tai kapea putken pitäisi olla, ja mistä materiaalista se tulisi valmistaa. Toisaalta materiaalivalintaan on voinut vaikuttaa aikoinaan myös se, mitä kulloinkin on ollut saatavilla. Sovijärvi perusteli erikoisten putkien käyttöä siten, että aikuisilla käytettäväksi sopii läpimitaltaan 9 mm ja lapsille hieman kapeampi 8 mm. Putken pituus valittiin lapsilla iän ja aikuisilla eri äänialan mukaan. (Sovijärvi 1969.)

Sovijärven (1969) suosituspituudet putkille:

Lapset 8–10-vuotiaat 24–25 cm

Lapset 11–12-vuotiaat 25–26 cm

Sopraano ja tenori 26 cm

Alempi sopraano ja tenoribaritoni 26,5 cm

Mezzosopraano ja baritoni 27 cm

Altto ja basso 28 cm

Myöhemmin ääniterapioissa on otettu käyttöön myös silikonista tehtyjä putkia, kuten Marketta Sihvon käyttämä Lax Vox (Sihvo 2006; Denizoglu 2010). Osa suosii silikoniputkia materiaalin vuoksi, sillä silikonin rikkoutumista ei tarvitse varoa samoin kuin lasisen putken. Lisäksi silikoni on joustavaa, jolloin pään optimaalisen asennon ylläpitäminen harjoittelun aikana voi helpottua. Osa henkilöistä voi kokea, ettei silikoniputkella saavuta yhtä tehokkaita resonanssituntemuksia kuin lasiputkea käytettäessä, osa voi kokea päinvastoin. Putken valitseminen onkin enemmän yksilöstä kiinni, sillä molemmissa hyödynnetään pidennetyn ääntöväylän lisääntynyttä vastusta (ks. Story, Laukkanen & Titze 2000; Sihvo & Denizoglu 2009).

### 2.3.2 Harjoitleminen putkien avulla

*Resonanssiputkiharjoittelussa* putki laitetaan suuhun noin yhden millimetrin verran hampaiden taakse ja huulet suljetaan tiiviisti putken ympärille. Sovijärvi suositteli terapiassa käytettäväksi erilaisia /jubbuu/, /jobboo/ /jybbyy/ -tyylisiä nonsense-sanoja. Kyseessä on kuitenkin enemmänkin pyrkimys kuvata tuntemillamme kirjaimilla ääntöä, eikä tarkoituksena ole toistaa kyseisiä sanoja juuri sellaisenaan. /j/:n tarkoituksena on ehkäistä kovia alukkeita, ja /bb/ vastaa ääntöä putkeen huulet suljettuna tiiviisti putken ympärille. /bb/-äännettä tulee pyrkiä pidentämään niin, että painetta kertyy suun sisälle ja kurkunpää ehtii laskea. Simberg ja Laine (2007) ovat tehneet kuvauksen siitä, miten putkia käytetään nykyisin ääniterapiassa. Useimmiten asiakasta ohjataan tuottamaan vain vokaalimaista ääntöä (/bb/-vaihe) putkeen, sillä osa asiakkaista kokee, että on hankala yrittää ääntää tiettyä sanaa putkeen. Vokaaliääntö on kuitenkin se vaihe, jossa putken aikaansaamat värinätuntemukset tulevat tehokkaimmin esille. Terapian edetessä on mahdollista lisätä erilaisia liukuja ja intonaatiovaihteluja putkiääntöön.

Putkien käyttö aloitetaan ääniterapiassa useimmiten veden kanssa (vesivastusterapia) ja ilmassa ääntämiseen siirrytään vasta harjoittelun edistymisen myötä. Putki laitetaan vesimaljaan yleensä noin 1–15 cm:n syvyyteen riippuen siitä, mitä tavoitellaan (Simberg & Laine 2007). Terapian yhteydessä saatetaan puhua ns. pinta- ja syväporinasta. Pintaporina on suhteellisen helppo tehdä, ja veden kuplinta toimii tällöin indikaattorina sille, että ääni ja ilma todella tulevat suun eikä nenän kautta ulos. Tämän vuoksi sitä voidaan käyttää apuna lapsilla, joilla on hypernasaalisuutta (rhinolalia aperta), ja tähän Sovijärvi myös resonanssiputkea alun perin aikoinaan käytti. Kevyt paineenvaihtelu kuplinnan ansiosta voi myös hieroa äänihuulia. Mitä syvemmällä putki on, sitä suuremman vastuksen vesi antaa ja sitä rankempi harjoitus on. Veden ja putken yhdistelmän ja sitä myötä kasvaneen ääntöväylän vastuksen ajatellaan laskevan kurkunpään asentoa kohti sen neutraalia asentoa,

sillä on melko tavallista, että kurkunpäättä nostavat lihakset ovat turhaan jännitettyinä äänentuoton yhteydessä. (Sovijärvi 1969; Simberg, Sala, Tuomainen, Sellman, Rönnemaa 2006; Simberg & Laine 2007.)

Resonanssiputkiharjoittelussa pyritään saavuttamaan mahdollisimman suuri hyöty akustisesta resonanssista. *Resonaatio* tarkoittaa myötävärähtelyä, ja se voidaan myös tuntea fyysisesti kudosten värähtelynä. Titze (2001) sekä Titze ja Laukkanen (2007) arvioivat, että resonanssiputken aiheuttama kasvanut suunsisäinen akustinen paine saa aikaan värinätuntemukset huulilla ja muualla kasvojen kudoksissa. Tutkimuksessa huulien takana sijaitseva paine oli kolminkertainen putkeen äännettäessä verrattuna /u/-vokaaliääntöön. Resonanssiputkiharjoittelussa pyritään saavuttamaan juuri näitä värähtelytuntemuksia kehoon ja erityisesti kasvojen alueelle, ja tuntemusten avulla voidaan tarkkailla, että harjoitukset toteutetaan oikein. Resonaatiovaikutuksen myötä voimistunut ääni ei ole kuitenkaan värähtelevien kudosten ansiota, sillä ne heijastavat ääntä heikosti. Värinätuntemukset ja äännön helpottuminen ovat pikemminkin seurausta äännön kynnyspaineen laskusta ja äänihuulivärähtelyn tehostumisesta kuin suun ja nenän alueen kudosten resonoinnista joidenkin äänessä olevien taajuuksien kanssa. Äänihuulivärähtelyn tehostumisen saa todennäköisemmin aikaan se, kun äänihuulivärähtely ja supraglottaalinen eli äänihuulten yläpuolinen akustinen paine alkavat resonoida keskenään. (Titze 2001; Titze & Verdolini Abbott 2012, 287.) Titzen ja Storyn (1997) mallinnusten mukaan epilaryngaaliputken kaventuminen näyttäisi mahdollistavan tämän supraglottaalisen paineen ja äänihuulivärähtelyn yhteistoiminnan.

Putkien avulla on mahdollista harjoittaa myös ääntöbalanssia, tilaa, jossa äänihuulivärähtely on optimaalisinta: ääni ei ole kireä eikä vuotoinen vaan kiinteä mutta silti mahdollisimman taloudellisesti tuotettu (ks. esim. Laukkanen 1992a; b). Ääntöbalanssin saavuttamista kutsutaan myös flow'ksi tai flow-äänneksi (flow phonation) (Sundberg & Gauffin 1978; Sundberg 1988). Määrittelyn mukaan flow on äänentuottotapa, joka ei sijaitse aivan keskellä äänentuottotapojen skaalaa, vaan se on hieman lähempänä huokoista/hypofunktionaalista päätyä. Flow'n kohdassa äänentuotto on kaikkein optimaalisinta, kun äänihuulet ovat niin kaukana toisistaan kuin mahdollista, mutta silti ne koskettavat äänihuulten koko mitalta. Tällöin henkilön on mahdollista saavuttaa mahdollisimman hyvä akustinen lopputulos mahdollisimman pienellä panostuksella kurkunpäässä. Titze (1988b) tutki tätä ja havaitsi, että optimaalinen voimakkuus äänihuulitasolla saavutetaan, kun äänihuulet koskettavat vain juuri ja juuri toisiaan tai ovat jopa hieman erillään. Toiset tutkijat käyttävät termiä resonant voice (Verdolini, Druker, Palmer, Samawi 1998; Titze & Verdolini Abbott 2012, 286–287), jolla viitataan samantyyppiseen optimaaliseen ja hyvin resonoivaan äänentuottotapaan. Laukkasen,

Lindholmin ja Vilkmanin (1995b) tekemässä tutkimuksessa havaittiin, että osallistujilla, joilla oli normaali ääni, ääniraon resistanssi pieneni putkiharjoittelun myötä. Osallistujalla, jolla oli todettu äänihuulten sulkuvajaus, ääniraon resistanssi ja sulkeutumisen tehokkuus puolestaan kasvoi. Tämä puoltaa sitä, että putkeen ääntäminen optimoi äänihuulivärähtelyä. Se myös vahvistaa sitä käytäntöä, että putkia käytetään sekä hypo- että hyperfunktionaalisten äänihäiriöiden hoidossa. (Sovijärvi 1969; Simberg ym. 2006; Simberg & Laine 2007).

Kapealla pillillä voi harjoitella äänentuoton ääriolosuhteita, kuten voimakkaassa äänentuotossa ja laulussa tarvittavaa suurta äänihuulten alapuolisen paineen muodostamista. Kapea pilli aiheuttaa suuren vastuksen ääntöväylään, jolloin sen avulla voi harjoittaa hengityslihasten toimintaa ja suurten subglottaalisten paineiden tuottamista ilman, että äänihuulten törmäysvoima kasvaa. Pillin aikaansaama vastus auttaa myös äänihuulivärähtelyä falsetissa, jolloin pillin avulla voi harjoitella korkeiden äänien tuottamista äänilämmittelyn aikana. (Titze 2002; Titze, Finnegan, Laukkanen, Jaiswal 2002.) Lisäksi pilli hidastaa ilman virtausta, joten voimakkuus- ja korkeusli'utuksista on mahdollista tehdä pidempiä kestojaan (Titze & Verdolini Abbott 2012, 302).

### 2.3.3 Harjoittelun vaikutukset: tuloksia aiemmista tutkimuksista

Putkiharjoittelun kokemuksena on usein, että harjoittelun jälkeen äänentuotto tuntuu helpommalta ja ääni kuulostaa voimakkaammalta. Lukuisissa tutkimuksissa on lisäksi saatu viitteitä siitä, että putkiharjoittelun avulla on mahdollista oppia taloudellisempi äänentuottotapa. Vielä ei ole kuitenkaan saavutettu tarkkaa tietoa siitä, mikä äänihuulitasolla tai ääntöväylässä saa aikaan kyseiset muutokset. Yksi akustinen havainto on, että äänessä olevat osasävelten voimistumat eli formantit (tässä tapauksessa F3, F4 ja F5) siirtyvät harjoittelun aikana lähemmäksi toisiaan taajuusasteikolla, jolloin niistä muodostuu osasävelten keskittymä, *formanttiklusteri* (Laukkanen ym. 2011). Tällaista formanttiklusteria 2,5–4,5 kHz:n alueella kutsutaan puhujan- tai laulajan formantiksi (Sundberg 1974; Leino 1994, Leino, Laukkanen, Radolf 2011), jonka on todettu tuovan lisää kuuluvuutta ääneen sekä metallikkaan, vahvan äänensävyyn. Mallinnusten mukaan klusteri näyttäisi muodostuvan, kun (kaventunut) kurkunpään ääntöväylä alkaa toimia omana resonaattorinaan erillään muusta ääntöväylästä (Sundberg 1974; Titze & Story 1997; Laukkanen, Radolf, Horáček & Leino 2009; Leino ym. 2011). Tätä teoriaa on myös kyseenalaistettu, sillä Detweiler (1994) ei havainnut tuloksissaan kurkunpään ääntöväylän ja nielun välisen kokoeron suhteellista kasvua, vaikka tutkittavina toimineilla, kolmella klassisen laulun koulutuksen saaneilla mieslaulajilla olikin nähtävissä laulajan formantti heidän äänestä tehdyissä spektreissään.

Vaikka puhujan ja laulajan formanttien muodostumisperiaate on sama, ne eroavat hieman toisistaan. Laulajan formantti havaitaan usein 2–3 kHz:n välillä, ja puhujan formantti sijaitsee hieman ylempänä 3–4 kHz:n välillä. (Leino ym. 2011.) Laulajan formantin sijoittuminen alemmas taajuusasteikolla johtuneen pääosin matalammasta kurkunpään asennosta (Laukkanen ym. 2009; Leino ym. 2011), vaikka sen muodostaminen onkin mahdollista myös kurkunpään nousun yhteydessä (Pabst & Sundberg 1993). Leino ym. (2011) tutkimuksen tulosten pohjalta pääteltiin, että puhujan formantti saavutetaan kurkunpään ääntöväylää kaventamalla, laajentamalla nielun tilavuutta ja toisaalta kaventamalla ääntöväylää suun etuosassa. Molemmat formantit voi oppia muodostamaan harjoittelun avulla, mutta puhujan formantti voi esiintyä myös sellaisilla henkilöillä, jotka eivät ole saaneet harjoitusta. Tällaisten henkilöiden ääni arvioidaan usein hyvälaatuisiksi kuulonvaraisissa testeissä. (Leino ym. 2011.)

Formanttiklusterin ansiosta ääni kuulostaa voimakkaammalta ilman, että henkilön täytyisi lisätä subglottaalisen paineen määrää tai äänihuuliadduktiota. Vampolan ym. (2011) tutkimuksessa havaittiin, että äänenpainetaso *SPL* kasvoi putkiharjoittelun myötä keskimäärin 3 dB kokonaisuudessaan ja noin 4 dB 2,5–4 kHz:n alueella. Kyseisellä alueella sijaitsivat myös suurimmat positiivisen reaktanssin arvot (reaktanssin määritelmä luvussa 2.5), mikä sopii yhteen laulajan ja puhujan formantti-teorioiden kanssa. Tutkimuksessa sama signaali syötettiin ääntöväylää vastaavaan malliin sellaisena kuin se oli ollut tutkimushenkilöllä ennen putkiharjoitusta ja harjoituksen jälkeen. Näin voitiin osoittaa, että vaikka mikään ei muuttuisi hengityksessä tai äänihuulten toiminnassa, väylämuutos riittää tuottamaan voimakkaamman ja kuuluvamman äänen.

Titze ja Laukkanen (2007) käyttivät tietokonemallinnusta tutkiessaan resonanssiputkiharjoittelun taloudellisuutta *MFDR/MADR*-suhdeluvun avulla. *MFDR*, maximum flow declination rate, kuvaa, miten nopeasti virtaus pienenee pulssissa, ja se korreloi *SPL*:n ja syntyvien yläsävelten voimakkuuden kanssa. *MADR*, maximum area declination rate, kuvaa puolestaan ääniraon sulkeutumisnopeutta. Sulkeutumisnopeuden kasvaessa myös äänihuulten välinen törmäyspaine kasvaa, ja se voi olla haitaksi äänihuulille. Taloudellisen äänentuoton kannalta olisikin toivottavaa, että saavutettaisiin ääneen mahdollisimman suuri intensiteetti (suuri *MFDR*-luku) niin, etteivät äänihuulet törmäisi yhteen suurella nopeudella (pieni *MADR*-luku). Näin ollen teoriassa, mitä suurempi *MFDR/MADR*-suhdeluku on, sitä taloudellisempaa äänentuotto on. (Titze 2006b.) Titze ja Laukkanen (2007) havaitsivat, että putkella pidennetty ääntöväylä ja /u/-ääntöä vastaava väylä saivat aikaan suuremmat taloudellisuusluvut kuin avoin väylä. Tämä viittaa siihen, että puolisuulilla ja ääntöväylän pidennyksillä harjoittelu voi auttaa taloudellisen ääntötavan oppimisessa. Tutkijat havait-

sivat lisäksi, että putken ja kavennetun kurkunpään ääntöväylän yhdistelmä sai aikaan suuremman taloudellisuusluvun kuin putken ja hieman leveämmän epilaryngaaliputken yhdistelmä.

Laukkasen, Titzen, Hoffmanin ja Finneganin (2008) tutkimuksessa havaittiin, että kasvanut ääntöväylän impedanssi sai henkilön lisäämään thyroarytenoid-lihaksen (TA, kilpi-kannurustolihas) jännitystä verrattuna cricothyroid (CT rengas-kilpirustolihas) ja lateral cricoarytenoid-lihaksen (LCA, ulkoinen rengas-kannurustolihas) jännitykseen. Kyseisten lihasten välisiä yhteyksiä tutkittiin myös tietokonemallinnuksen avulla, jossa havaittiin, että taloudellisempi ja tehokkaampi äänentuotto saavutetaan, kun TA-lihaksen jännitys on suhteessa suurempi kuin CT-lihaksen, jos LCA-lihas on samanaikaisesti riittävän jännittyneenä aikaansaaden ideaalin adduktion. Näiden lihasaktivaation muutoksiin perustuvien tulosten mukaan henkilö näytti siis muokkaavan ääntään taloudellisemmaksi putkiharjoittelun aikana.

Vampolan ym. (2011) tietokonetomografialla ja Laukkasen ym. (2012b) magneettikuvauksella toteutetuissa tutkimuksissa putkiharjoittelun aikaansaamat selkeimmät muutokset olivat, että nenäportin sulku tiivistyi ja ääntöväylän poikittainen pinta-ala kasvoi. Kyseisissä tutkimuksissa oli mukana yksi tutkittava, ja mittaukset tehtiin ennen putkeen ääntämistä, sen aikana ja putkeen ääntämisen jälkeen. Ääntöväylän poikittaisen pinta-alan kasvun myötä kurkunpään ääntöväylän ja välittömästi sen yläpuolella olevan putken suhteellinen kokoero kasvoi, mikä voi selittää kasvaneen SPL:n: Sundbergin (1974) mallinnustutkimuksen mukaan ”ring”:in määrä on erityisen suuri ja laulajan formantti selkeästi havaittavissa, jos ylempi ääniväylä on vähintään kuusinkertainen välittömästi äänihuulten yläpuolella olevaan tilaan verrattuna. Lisäksi taskuonteloiden ja päärynämäisten onteloiden (sinus piriformes) täytyisi olla leveät. Nämä olosuhteet voitaisiin Sundbergin mukaan saavuttaa kurkunpäästä laskemalla, mikä on tyypillinen tekniikka esimerkiksi klassillisessa laulussa. Laukkasen, Horáčekin ja Havlikin (2012a) tutkimuksessa äänilämmittelyn jälkeen naispuolisella puhe-tekniikan opettajalla nielun kokoero oli 5–7:1 ja mieslaulajalla 3–4:1. Ainoastaan miehen kurkunpää laski äänilämmittelyn myötä ja naisella nielun tilavuus laajeni ilman kurkunpään laskua, minkä ajateltiin selittyvän erilaisilla harjoittelutraditioilla.

Eri materiaaleista valmistetuilla putkilla näyttäisi olevan tutkimusten mukaan samansuuntaisia vaikutuksia. Laukkanen ym. (2012b) tutkivat MRI:n avulla ääntämistä väljään juomapilliin ja havaitsivat, että sillä on samansuuntaisia vaikutuksia äänentuotolle kuin lasiseinäistä resonanssiputkea käytettäessä. Kumpaakin käytettäessä ääntöväylä laajeni, nielun ja kurkunpään ääntöväylän yhtymäpintojen pinta-alaero kasvoi, ja ääneen muodostui puhujan formanttiklusteri. Samassa tutkimuksessa tehtiin akustiset mittaukset myös kymmeneltä muulta henkilöltä, joilla ei ollut yhtä paljon kokemus-

ta ääniharjoittelusta. Heidän tuloksissaan oli myös nähtävissä samansuuntaisia tuloksia kuin kokeneemmalla henkilöllä, vaikkakin muutokset olivat pienempiä. Tilastollisesti merkitseviä muutoksia kokemattomammilla osallistujilla oli, että F3:n taajuus nousi ja F4:n laski, ja siten myös F3–F4 välinen ero pieneni. Putken materiaalia merkittävämpi tekijä näyttää siis olevan harjoittelijan kokeneisuus harjoitusmetodin käytöstä.

Valitun putken pituus voi myös vaikuttaa harjoituksen tehokkuuteen ja tutkimustuloksiin. Eräässä tutkimuksessa käytettiin kolmea hyvin eripituista putkea, joista lyhyimmän putken ja kahden sitä pidemmän putken välillä oli havaittavissa muutoksia saaduissa tuloksissa (Laukkanen, Pulakka, Alku, Vilkinen, Hertegård, Lindestad, Larsson ja Granqvist 2007). Pidempiin putkiin äännettäessä perustaajuus laski, ääniraon aukiolovaihe lyheni ja subglottaalinen paine kasvoi. Kahden pidemmän putken, 60 cm ja 100 cm, välillä ei ollut havaittavissa juuri eroa. Myöskään Storyn, Laukkasen ja Titzen (2000) tulosten mukaan 100 cm:n putki ei enää tuonut lisähyötyä verrattuna 50 cm:n pituiseen putkeen. Sitä lyhyempiin verrattuna 50 cm:n putki se sijaan näytti olevan optimaalisempi. Mallinnuksessa ääntöväylänä toimi kuitenkin 17,5 cm:n pituinen putki, joka vastaa miehen ääntöväylän pituutta. Naisten ääntöväylä on lyhyempi, jolloin myös lyhyemmän resonanssiputken käyttäminen voi olla perusteltua. Laukkasen (1992) tutkimuksessa muutaman sentin ero putken pituudessa ei näyttänyt saavan aikaan merkittäviä muutoksia ilmaan äännettäessä: osallistujien subjektiivisissa kokemuksissa, EGG-signaalissa tai akustisissa mittauksissa ei ollut havaittavissa merkittäviä eroja eripituisten putkien välillä. Sovijärven (1969) alkuperäiset, senttimetrin tarkat ehdotukset kullekin äänialalle eivät siten välttämättä ole tarpeellisia, kun putkea pidetään ilmassa. Sovijärvi käytti teraatioissaan kuitenkin vettä lisävastuksena, jolloin ääntöväylän virtausvastus kasvaa. Tämän vuoksi muutaman sentin ero putken pituudessa saattaisi vaikuttaa enemmän kuin ilmaan äännettäessä ja aiheuttaa siten esimerkiksi kurkunpään voimakkaamman laskun. Myös mitä syvemmillä vedessä putkea pidetään, sitä enemmän virtausvastus kasvaa.

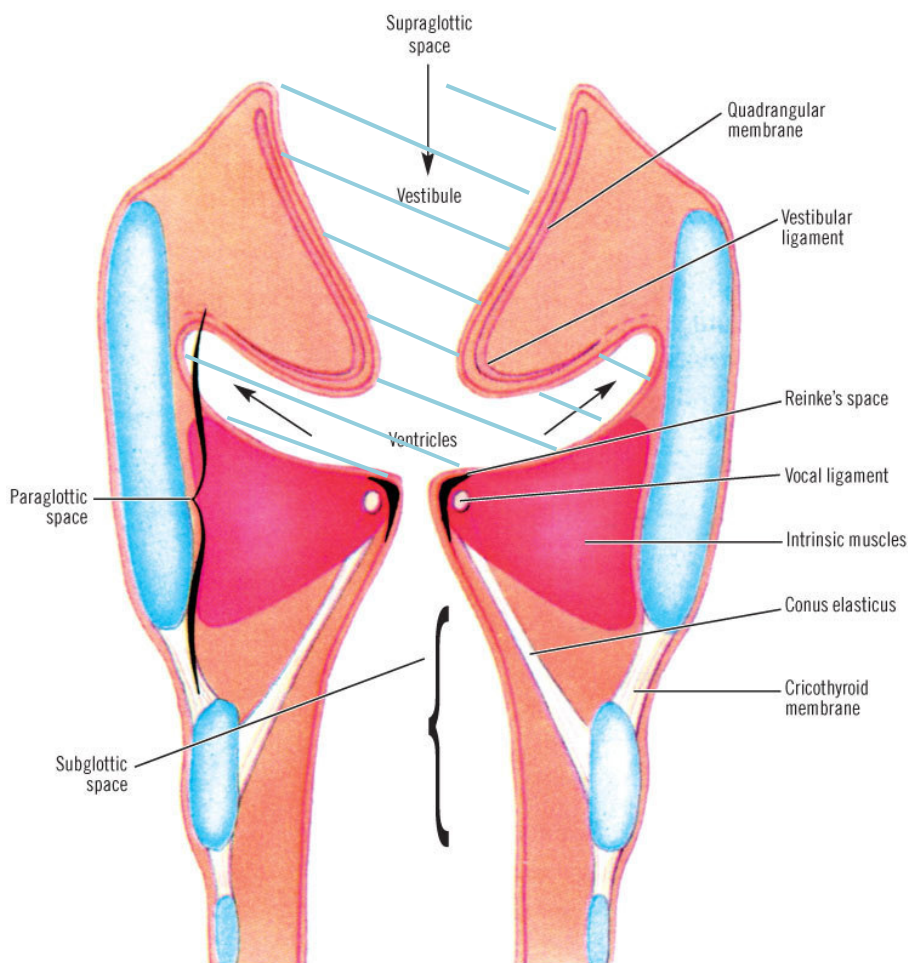
## 2.4 Kurkunpään ääntöväylä eli epilaryngaaliputki

### 2.4.1 Anatomia

Kurkunpään ääntöväylällä tarkoitetaan ääntöväylän alimpia osia. Se käsittää äänihuulten yläpuolelta tilasta *taskuontelot* (*laryngeal ventricle*), *taskuhuulet* ja *kurkunpään eteisontelon* (*vestibule*, *vestibulum laryngis*). Taskuonteloilla tarkoitetaan taskuhuulten ja äänihuulten väliin jäävää tilaa. Vestibula puolestaan on taskuonteloiden yläpuolella sijaitseva ontelo, kurkunpään ylin osa. (Seikel,



King & Drumright 2010.) Kurkunpään ääntöväylä (epilaryngaaliputki) ulottuu siten äänihuulista kurkunpään ylämpään osaan saakka (aditus laryngis, kurkunpään aukko). Se on pituudeltaan 2,5–3 cm ja sen pinta-ala voi vaihdella 0,2 cm<sup>2</sup>:stä 1,0 cm<sup>2</sup>:iin henkilöstä ja äänenlaadusta riippuen (Story 2005). Joissain tutkimuksissa käytetään myös termiä aryepiglottic sphincter, jolla viitataan lihakseen, joka sulkee kurkunkannen ja kannurustojen väliin jäävän tilan, eli kurkunpään ääntöväylän suuaukon (ks. esim. Yanagisawa ym. 1989).



Copyright ©2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

**Kuva 2.** Kurkunpään ääntöväylä eli epilaryngaaliputki muodostuu taskuonteloista (ventricles) ja kurkunpään eteisontelosta (vestibule). (Alkuperäinen kuva: McGraw-Hill Companies Inc. 2006.)

Kurkunpään ääntöväylän kaventuminen tapahtuu useamman eri lihaksen supistumisen ansiosta: Kannurusto-kurkunkansi-lihas ja ristikkäinen kannurustolihas alkavat kannurustoista ja kiinnittyvät kurkunkannen sivuille muodostaen näin kurkunkansipoimun (aryepiglottic fold) eli kurkunpääputken seinämän lihasosan. Myös kilpirusto-kannurustolihas (thyroarytenoid, äänihuulen sisäinen

lihas, TA) säikeitä kulkee kurkunkansipoimuun. Kyseisten lihasten alkuperäisenä tehtävänä on suojella ilmateitä nielaisun aikana niin, että ne kaventavat kurkunpään yläosaa ja kääntävät kurkunnen kurkunpään päälle. TA-lihaksen jännittäminen myös lyhentää ja paksuntaa äänihuulia, jolloin ne ovat lähempänä toisiaan. (Seikel ym. 2010.)

#### 2.4.2 Kurkunpään ääntöväylän kaventuminen

Resonanssiputkeen äännettäessä syntyvä ääni on melko vaimea. Tämä johtuu siitä, että kun ääntöväylä on kavennettuna ylempää, esimerkiksi suun etuosasta, kokonaisäänenpaine laskee huolimatta siitä, että sävelkorkeus ja subglottaalinen ilmanpaine pysyvät samana. Tämä on havaittavissa helpoimmin eri vokaalien ominaisvoimakkuuseroissa niin kuin jo luvussa 2.1 todettiin. Näin ollen ei ole esimerkiksi tarkoituksenmukaista opetella puhumaan putkia simuloivalla tavalla, huulet eteenpäin työnnettynä, sillä silloin impedanssin sovitus saavutettaisiin äänenvoimakkuuden kustannuksella. Putkilla harjoittelun ideaalina onkin, että kun kaventuma poistuu ylempää ääntöväylästä putkilla tai puolisuulilla harjoittelun jälkeen, ääntöväylän muut asetukset eivät juuri muutu. Oletuksena on, että kurkunpään ääntöväylän ja sen yläpuolella sijaitsevan väljemmän tilan välille muodostuu putkeen ääntämisen aikana kokoero, joka saisi aikaan äänentuotolle edullisen ja ääntä voimistavan vaikutuksen samalla kun ylempi ääntöväylä on avoin niin, että ääni heijastuu voimakkaana ulos. Tällöin äänentuotto olisi mahdollisimman tehokasta ja taloudellista, ja mahdollinen kaventuma säilyttäisi painetta ääniraon yläpuolella estäen äänihuulten liian voimakkaan yhteen osumisen. (Titze 2006b.)

Ääntä tuotettaessa on vaikeaa ajatella kaventavansa kurkunpään ääntöväylää, sillä sen poikittaisen pinta-alan sensorinen havaitseminen on hankalaa (Titze & Verdolini Abbott 2012, 300). Ihminen voi kuitenkin tietoisesti kaventaa tai sulkea kurkunpään ääntöväylän nielaisun tai ponnistuksen yhteydessä, mutta hienovaraisemman kavennuksen muodostaminen voi olla vaikeaa. Tämän vuoksi esimerkiksi Complete Vocal Techniquessa twangiä harjoitellaan mielikuvien avulla niin, että yritteään matkia ankan vaakuntaa (Sadolin 2009). Tutkimusten avulla on saatu selville, että twangin kaltainen äänenlaatu saadaan aikaan epilaryngaaliputkea kaventamalla (Yanagisawa ym. 1989).

Kaventuman muodostamista voidaan mahdollisesti harjoittaa myös puolisuulujen tai ääntöväylän pidennysten avulla, jossa kaventuma on aluksi ylempänä ääntöväylässä. Titzen (2006b) tietokone-mallinnuksissa saatujen tulosten mukaan tällainen väylän alaosasta leveä mutta ylempää kapea (putki suussa tai puolisuulku) ääntöväylän muoto on ”anteeksiantavaisempi”. Siten saavutetaan matalat akustiset paineet, pienempi äänihuulten värähtelyamplitudi ja säilytetään paine suun sisällä, mut-

ta se ei vaadi yhtä paljon lihasten hienovaraista säätelyä kuin kurkunpään ääntöväylän kaventaminen. Huonona puolena kaventuneen kurkunpään ääntöväylän muodossa nimittäin on, että äänihuulten värähtelyamplitudi ja ääniraon pinta-ala kasvavat suhteellisen suureksi, mikä vaikeuttaa kurkunpään sisäisten lihasten hallintaa ja itsestään ylläpitävän äänihuulivärähtelyn toteutumista. Niinpä putkia ja puolisulkuja olisi hyödyllistä käyttää apuna ääniharjoittelussa, kun haetaan oikeita asetuksia ääntöväylälle. Jos siis putkilla tai puolisuluilla harjoittelemisen ei saisikaan aikaan varsinaista kaventumaa kurkunpään ääntöväylässä, niiden avulla voi saada kokemuksen helpommasta äänen tuottotavasta, mitä voi alkaa tavoitella tavallisessa äänenkäytössään. Säännöllisen harjoittelun myötä tämä voi johtaa kurkunpään ääntöväylän kaventumiseen, sillä itseään ylläpitävä äänihuulivärähtely edellyttää ”hidasteen” muodostamista ääniväylään, jotta painetta ehtii kertyä myös äänihuulten yläpuolelle. (Titze 2006b.)

#### 2.4.3 Kurkunpään ääntöväylän kavennus eri laulutyyeissä

Formanttiklusterin ja kapean kurkunpään ääntöväylän on todettu olevan läsnä erilaisten laulutyylien yhteydessä. Estillin, Baerin, Hondan ja Harrisin (1985) tutkimuksessa tutkittiin kuutta erilaista äänenlaatua, joista oopperassa, belttauksessa ja twangissa oli havaittavissa 3 kHz:n alueella voimistuma. EMG-mittausten avulla toteutetussa tutkimuksessa kyseisiä laulutyyliä tuotettaessa leuka-kieliluulihaksen (geniohyoid), joka liikuttaa kieliluuta etu-takasuunnassa, aktiviteetti kasvoi, mikä voisi tutkijoiden mukaan kertoa laajentuneesta nielun tilavuudesta. Kaikissa kolmessa laulutyyliässä kurkunpään ääntöväylä on lisäksi kavennettuna. (Yanagisawa ym. 1989.)

Kyseiset laulutyyliä ovat tunnettuja voimakkaasta, metallikkaasta ja jopa hyperfunktionaaliselta kuulostavasta soinnistaan. Belttaus määritellään laulutyyliksi, joka on poikkeuksellisen voimakas, ja johon liittyy vain vähän tai ei ollenkaan vibratoa mutta hyvin paljon nasaalisuutta (Miles & Hollen 1990). Twang on belttauksen tapaan hyvin yleisesti käytetty laulutyyli erityisesti populaarimusiikin parissa, ja se kuulostaa usein voimakkaalta ja korkealta tuotetulta. Twangin suuri SPL johtuu todennäköisesti voimistuneista F1 ja F2 -formanteista. (Sundberg & Thalén 2010.) Twang ja belttaus eroavat oopperatyylistä siten, että kahdessa ensimmäisessä nielun tilavuus on pienempi kuin oopperalaulussa (Titze & Story 1997), vaikka nielu näyttäisi olevan niissäkin väljempi kuin normaaliäännessä (Estill ym. 1985).

Kurkunpään kaventumiselle näiden laulutyylien yhteydessä on esitetty parikin syytä. Titze ja Story (1997) arvioivat tietokonemallinnustensa avulla, että kurkunpään ääntöväylän kaventaminen on välttämätöntä tämäntyyppisessä laulussa, jotta äänihuulivärähtely pysyy yllä. Toisaalta Yana-

gisawan ym. (1989) tutkimuksen akustisista mittauksista nähtiin, että kaventuma voimisti ylempiä taajuuksia, mikä mahdollisti voimakkaan soinnin ääneen. Myös Titze (2006) havaitsi, että tietokonesimulaatiossa muodostettu kavennus kurkunpään ääntöväylässä sai aikaan "ring":in, äänihavainnon, jonka aiheutti akustisen energian kertymä 3000 Hz:ssä. Titzen ja Storyn mukaan (1997) kaikkein ideaalisin tilanne syntyy juuri kavennetun epilaryngaaliputken ja väljennetyn nielun yhdistelmästä - silloin olosuhteet ääntöväylässä ovat reaktiiviset ja resistanssin määrä matalammilla taajuuksilla pieni. Tämä tarkoittaa sitä, että äänivärähtelyn syttymiskynnys on matalampi. Tällainen tilanne syntyy oopperalaulussa mutta myös esimerkiksi belttauksessa ja twangissa. Vaikka ääntöväylän resistanssi on belttauksessa ja twangissa suurempi ja reaktanssi vaihtelee enemmän, kurkunpään ääntöväylän kaventuminen riittää aikaansaamaan samantyyppisen akustisen energiahuipun kuin oopperalaulussa.

Myös hevimetallilaulussa saatetaan hyödyntää kurkunpään ääntöväylän kaventamista: tyylikeinona käytettävä hälypitoinen huuto saatiin aikaan kahdella tavalla: joko kurkunpään ääntöväylää kaventamalla tai taskuhuulien kontaktilla (Eckers, Hütz, Kob, Murphy, Houben & Lehnert 2009). Tässä tapauksessa kaventumaa käytetään siis hieman eri tavalla kuin edellä mainituissa tyyllilajeissa.

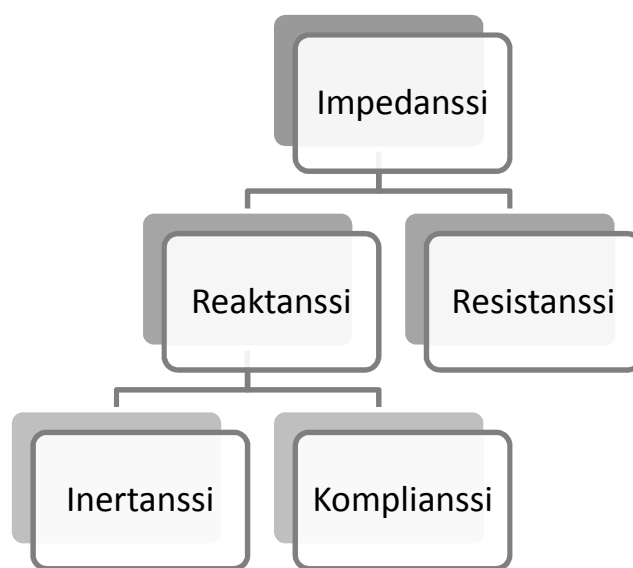
## 2.5 Impedanssi

### 2.5.1 Impedanssi, reaktanssi, inertanssi – käsitteiden määrittelyä

Ääntöväylän erikokoiset osat ja esteet vaikuttavat ilmanpaineen kulkuun ääntöväylässä, erityisesti puolisulkuharjoitusten tai putkiharjoittelun aikana. Osa ilmanpaineesta kulkeutuu ääntöväylästä ulos, mutta osa kohdistuu myös takaisin äänilähteeseen aiheuttaen muutoksia niin äänilähteessä kuin ääntöväylässäkin. Perinteisen lineaarisen lähde-suodatin-teorian sijaan puhutaankin epälineaarisesta vaikutuksesta (non-linear interaction) äänilähteen ja ääntöväylän välillä (Titze 2004; 2006a; 2008).

*Impedanssi* eli taajuusriippuva vastus tarkoittaa suhdelukua paineen ja virtauksen välillä. Se kertoo, miten paljon painetta tarvitaan, jotta saadaan tietty virtaus aikaiseksi. Impedanssi koostuu kahdesta osasta, reaktanssista ja resistanssista. Impedanssi on resistiivistä silloin, kun ärsykkeen ja vasteen välillä ei ole aikaviivettä. Impedanssi on puolestaan reaktiivista aikaviiveen ilmetessä. Jos se on ennakoivaa, puhutaan *komplianssista* ja jos taas reagointi ärsykkeestä vasteeseen viivästyy, puhutaan *inertanssista* (ks. kuva 3). Inertiivinen reaktanssi eli inertanssi auttaa äänihuulten värähtelyä, sillä positiivinen paine ääntöväylässä yhdessä subglottaalisen paineen kanssa auttavat äänihuulia

erkanemaan toisistaan. Äänihuulten sulkeutuessa ääntöväylän ilmapatsaan inertia saa aikaan negatiivisen paineen äänihuulten yläpuolelle imaisten äänihuulet yhteen. Komplianssi sen sijaan toimii päinvastoin, se saa aikaan negatiivisen paineen ääntöväylään äänihuulten avautuessa ja positiivisen paineen äänihuulten alkaessa sulkeutua. Näin ollen henkilö joutuu käyttämään ylimääräistä energiaa voittaakseen komplianssin vaikutuksen ja ylläpitääkseen äänihuulivärähtelyn. (Titze & Story 1997; Titze & Laukkanen 2007; Titze & Verdolini 2012, 289–297.) Jos impedanssi on suhdeluku paineen ja virtauksen välillä, sen kasvattaminen onnistuu luonnollisesti joko ääntöväylän ilmanpainetta kasvattamalla tai ilman virtauksen nopeutta hidastamalla. Näin ollen impedanssin määrä on riippuvainen siitä, kuinka pitkän matkan tai kapean väylän läpi ilmanpaine joutuu kulkemaan.

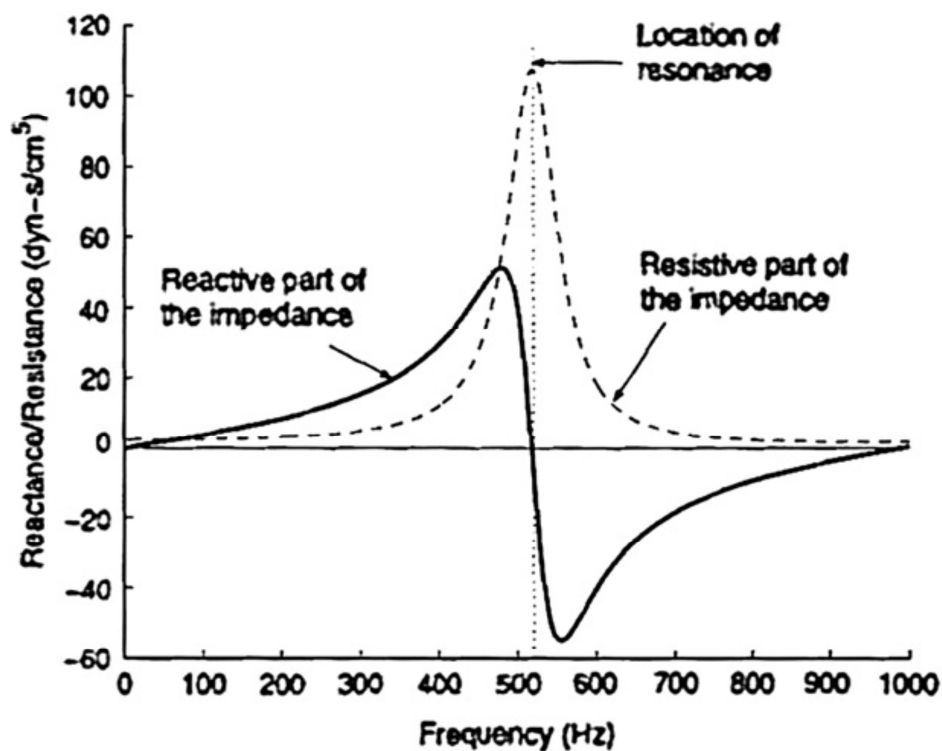


**Kuva 3.** Impedanssi ja mistä osista se muodostuu. Putki- ja puolisolkuharjoitusten teho perustuu impedanssin ja erityisesti inertanssin osuuden kasvuun.

### 2.5.2 Akustinen impedanssi putkiharjoittelussa

Useissa tutkimuksissa on selvitetty puolisolukujen ja ääntöväylän pidennysten käytön hyötyjä. Niiden aikaansaamat muutokset ovat pitkälti impedanssin suuruudesta ja laadusta riippuvaa (mm. Titze 2001; 2004; 2006a;b; Story ym. 2000). Harjoitusten aikana ääntöväylän impedanssi kasvaa, jolloin äännön kynnyspaine madaltuu. Kasvanut impedanssi muokkaa myös äänihuulten virtauspulssia ja vaikuttaa äänihuulten värähtelytapaan muuttamalla äänihuulten muotoa. (Fant & Lin 1987; Titze 1988a; Story ym. 2000; Titze & Story 1997; Titze 2006b.) Ääntöväylän pidentäminen vaikuttaa formantteihin siten, että erityisesti F1 laskee. Formantit ja impedanssi liittyvät toisiinsa puolestaan siten, että impedanssin määrä on huipussaan resonanssitaajuudella (ks. kuva 4); tällöin tosin resistanssin määrä on maksimissa ja reaktanssin määrä on nolla. Kuvasta 4 on nähtävissä, että reaktans-

sin huippu ilmeneekin juuri ennen ensimmäistä formanttia. Niinpä ääntö on reaktiivisinta silloin, kun se tuotetaan samalta taajuudelta kuin missä reaktanssihuippu sijaitsee. Näin ollen, ainakin teoriassa, F1:n laskun myötä ääntä on helpompi tuottaa sellaiselta perustaajuudelta, joka on lähempänä F1:stä, eli lähempänä reaktanssihuippua, mutta se ei silti ole liian korkea taajuus tuotettavaksi. Siis kun F1 ja F0 siirtyvät lähemmäksi toisiaan taajuusasteikolla, impedanssin reaktiivisen osuuden määrä kasvaa. (Story ym. 2000; Titze & Laukkanen 2007.) Vampolan ym. (2011) tutkimuksessa todettiin, että inertanssin määrä oli noin kaksinkertainen putkiharjoittelun jälkeen kuin sitä ennen. Myös Gaskill ja Quinney (2012) havaitsivat resonanssiputkella toteutetussa tutkimuksessa, että suurimalla osalla osallistujista F1 laski alle 300 Hz:iin putkiäännössä ja F1:n ja F0:n välinen ero oli keskimäärin 123 Hz. Tämä muutos formanttien välisessä etäisyydessä on voinut johtaa myös kasvaneeseen inertanssin määrään F0:n taajuudella.



**Kuva 4.** Impedanssikäyrä yhtenäiselle putkelle, joka on 17,5 cm pitkä ja 3 cm<sup>2</sup> poikkipinta-alaltaan. Impedanssi on reaktiivista resonanssihuipun alapuolella, minkä jälkeen reaktanssin osuus putoaa jyrkästi. Optimaalisin tilanne saavutettaisiin, jos äännon perustaajuus olisi samassa kohdassa kuin reaktanssin huippu. (Alkuperäinen kuva Story ym. 2000).

Sen lisäksi, että ääntöväylän pidentäminen ja kasvanut impedanssi saa aikaan jo itsessään vaikutuksia niin äänihuulivärähtelyssä kuin formanttien sijoittumisessa, pidentäminen saattaa saada aikaan

muutoksia myös ääntöväylässä. Keskeisessä osassa toimii ääntöväylän alin osa, kurkunpään ääntöväylä. Tietokonemallinnuksia tutkimalla (Titze & Story 1997; Titze 2004; 2006; Titze & Laukkanen 2007) on saatu selville, että kaventamalla kurkunpään ääntöväylää on mahdollista saada aikaan äänihuulten ja ääntöväylän *impedanssin yhteensovittuminen*. Siinä ääntöväylän impedanssi saadaan vastaamaan äänilähteen impedanssia. Titzen (2004) artikkelissa havaittiin, että kurkunpään ääntöväylän kaventamisen ja impedanssin yhteensovittumisen ansiosta F0 eivätkä kolme ensimmäistä harmoonia (osasäveltä) ylitä F1:stä, jolloin ne pysyttelevät reaktiivisella taajuualueella.

Kurkunpään ääntöväylän kaventuminen saattaa lisäksi vähentää resistanssin määrää F1:n yläpuolella. Titzen ja Laukkasen (2007) tietokonemallinnuksella toteutetussa tutkimuksessa havaittiin, että pidentynyt väylä sai aikaan komplianssin F1:n yläpuolella 150 Hz:n ja 250 Hz:n välillä. Mallin osien poikittaisia pinta-aloja vaihtelemalla saatiin selville, että komplianssin taajuualueetta on mahdollista saada pienemmäksi kurkunpään ääntöväylää kaventamalla. Niinpä maksimihyöty putkeen ääntämisellä saavutettaisiin, jos siihen ääntäminen kaventaisi samanaikaisesti myös kurkunpään ääntöväylää.

Titze ja Story (1997) havaitsivat, että kavennetun kurkunpään ääntöväylän ja välittömästi sen yläpuolella oleva väljemmän tilan yhdistelmä sai aikaan sen, ettei komplianssia esiintynyt alle 3000 Hz:n, ja että kurkunpään ääntöväylän kaventaminen toi formantit lähemmäksi toisiaan: kolme ensimmäistä formanttia siirtyi ylemmäksi taajuuasteikolla ja neljäs ja viides formantti laskivat.

Impedanssilla on suuri merkitys taloudellisesta äänen tuottotavasta puhuttaessa myös siten, että juuri sen avulla on mahdollista kehittää ääntöbalanssia. Äänihuulten yläpuolella olevan paineen kasvu estää äänihuulia painumasta liian tiukasti yhteen ja toisaalta sama paine tekee myös hypofunktionaalisen äänen tuoton mahdottomaksi: paineesta johtuen äänihuulten adduktiota on välttämätöntä lisätä, jotta äänivärähtely on mahdollista kyseisissä olosuhteissa. Tämä pätee ainakin silloin, kun käytetään riittävän suurta virtausvastusta, eli kun putki on tarpeeksi kapea tai sen pää on upotettuna veteen. (ks. esim. Simberg & Laine 2007.)

## 2.6 Nasofiberoskopia

Nasofiberoskooppi on kuituoptiikalla varustettu kameran ja ohuen kaapelin yhdistelmä. Ohut, valoa johtava kaapeli johdetaan nenäontelosta nenäportin kautta nieluun, ja kaapelin kärki asetetaan noin kurkun kannen korkeudelle. *Nasofiberoskopian* avulla voidaan tutkia muun muassa äänihuulia ja kurkunpäättä. Nasofiberoskoopin etu tavallisen kurkkupeiliin tai suun kautta tehtävään laryngosko-

piaan on se, että nasofiberoskopiassa puhuminen sujuu häiriöttä, kun skooppi ei ole artikulaattoreiden tiellä. (Baken & Orlikoff 2000, 398.) Lisäksi kurkunpään kohdalle voidaan asettaa iholle mikrofoni, jonka avulla voidaan tallentaa ääntä sekä mitata äännön perustaajuutta ja äänenvoimakkuutta. Perustaajuuden määrittämisen jälkeen äänihuulia on mahdollista valaista suhteessa äänihuulten värähtelynopeuteen niin, että valon välähdys on yhtä pitkä tai vain hieman eripituinen kuin yhden äänihuulivärähdysen pituus. Tällöin syntyy optinen illuusio, jossa kameran kuvaama liike näkyy joko paikoillaan olevana (välähdys tasan yhtä pitkä kestoltaan kuin äänihuulivärähdys) tai hidastettuna (välähdys eripituinen kuin äänihuulivärähdys). Kyseistä tutkimustavasta käytetään nimeä stroboskopia (Hirano & Hartmann 1986; Baken & Orlikoff 2000, 399–402.) Näin on mahdollista tutkia esimerkiksi kurkunpään anatomiaa, äänihuulten liikettä ja äänihuulten limakalvojen värähtelyliikettä (Elias, Sataloff, Rosen, Heuer & Spiegel 1997). Nasofiberoskopialla on kuitenkin huonot puolensa: potilaan tutkimisessa voi ilmetä vaikeuksia, nasofiberoskopialla voi olla vaikea saada objektiivisesti mitattavissa oleva dataa, ja skoopin laajakulmaobjektiivi voi vääristää kuvan reunoja todellista pienemmiksi (Casper, Brewer & Colton 1988).

Nasofiberoskopian yhteydessä voidaan käyttää apuna puudutusta, sillä skoopin asettaminen voi tuntua tutkittavasta henkilöstä epämiellyttävältä. Nenän ja nielun puuduttamisessa on kuitenkin myös omat puutteensa. Puudute vaikuttaa hetkelliseen syvätuntoon, jolloin henkilö ei tunne hengityksen kulkua ääntöväylässä eikä tunne, missä asennossa kieli tai nenäportti on. Näin ollen subjektiiviset kokemukset tästä voivat olla, että henkilö kokee tukehtuvansa. Tästä johtuen puudutus voi mahdollisesti vääristää saatavia tuloksia tai haitata tutkimuksen suorittamista. Lisäksi puudutteen käyttöä koskevissa tutkimuksissa on saatu useampia tuloksia puudutteen tarpeettomuudesta. Esimerkiksi Froshin, Jayarajin, Porterin ja Almeydan (1998) mukaan puudutteen käyttö lisäsi nasofiberoskopiaturkimuksen epämiellyttävyyttä ja sen aiheuttamaa kipua. Georgalasin, Sandhun, Froshin, Xenellisin (2005) tutkimuksessa puudutusta saaneiden ja placebo-sprayta saaneiden ryhmien välillä ei ollut merkitsevää eroa toimenpiteen epämiellyttävyydessä tai sen aiheuttamassa kivun määrässä. Myöskään Cainin, Murrayn ja McClymontin (2002) tutkimuksessa ei havaittu olevan merkitsevää hyötyä puudutteen käytämisellä.

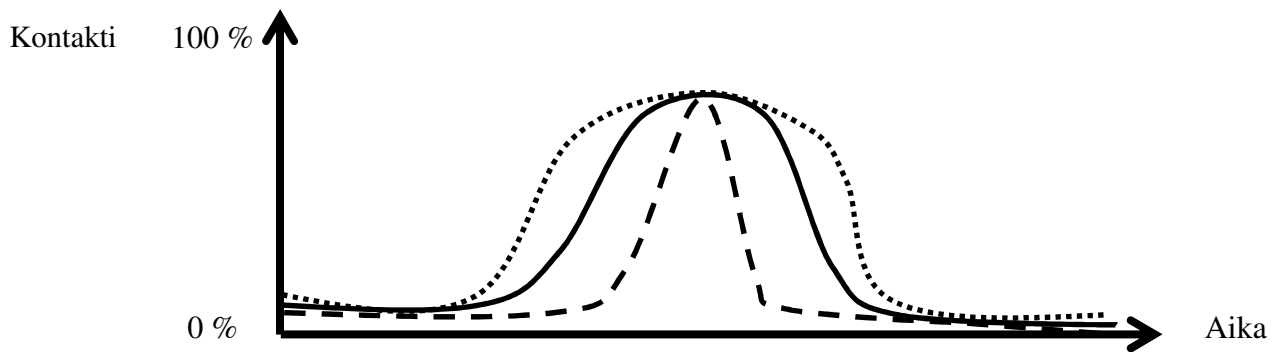


## 2.7 Äänihuulikontaktin tiiviyyden mittaaminen

### 2.7.1 Elektroglottografia

*Elektroglottografia* (EGG) on menetelmä, jolla voidaan taltioida äänihuulivärähtelyn signaalia. Kaulalle asetetaan kurkunpään molemmiin puolin mahdollisimman tarkasti äänihuulten korkeudelle elektrodit, joiden välistä johdetaan heikkoa sähkövirtaa. Sähkövirran kulkeutuminen elektrodista toiseen on tehokkainta silloin, kun äänihuulet ovat yhdessä. Heikointa se on silloin, kun äänihuulet ovat erillään, sillä silloin äänihuulten välissä on ilmaa, joka johtaa sähköä huonosti. Tällöin sähkövirta kulkeutuu ympäröivän kudoksen kautta ja sähkövirran reitti elektrodista toiseen pitenee eli kulkureitin impedanssi kasvaa. (Baken & Orlikoff 2000, 414.) Äänihuulten kontakti on mahdollista tulkita EGG-signaalin muodosta näiden sähkövirran reitin muutosten ansiosta. EGG-signaali tallennetaan tutkimuksissa usein nasofiberoskopian yhteydessä. Tämä on hyödylliseksi todettu menetelmä, sillä kyseiset menetelmät täydentävät toisiaan (Karnell 1989). Nasofiberoskopiolla voidaan saada lisäselvyyttä siihen, miltä EGG-signaali näyttää ja toisin päin.

Titze (1990) on selvittänyt tietokonemallituksen avulla sitä, miten EGG-signaalia voidaan tulkita. Esimerkiksi signaalin pulssin laajentuminen voi kertoa lisääntyneestä adduktiosta eli äänihuulten lähentymisestä tai tiiviimmästä sulusta. Signaali on myös usein vino toiselle puolelle, mikä aiheutuu äänihuulten vaihteittaisesta pystysuuntaisesta kontaktoitumisesta: Äänihuulet loittonevat hitaammin kuin lähentyvät ja ääniraon avaumavaiheessa äänihuulten yläosat ovat kiinni toisissaan kauemmin. Äänihuulten muoto muuttuu näin äänihuuliperiodin aikana neliskanttisesta enemmän kiilaa muistuttavaksi vertikaalisuunnassa, mikä siis aiheuttaa pulssin vinouden. Käytännössä kaikki ihmisäänen EGG-signaalit ovat erilevyisiä ja vinoja jonkin verran. Signaalissa voi näkyä myös äkillinen kontaktin kasvu niin sulkeuma- kuin avaumavaiheessa, mikä aiheutuu äänihuulten keskikohdan osuessa yhteen. Kyseisessä kohdassa äänihuulivärähdys sykliä äänihuulet ovat pulleammat ja kontaktin määrä suurempi. Toisaalta värähtely voi tapahtua pystysuunnassa niin vaihteittain, että signaalin muoto alkaa muistuttaa enemmän kolmion mallia. Tällöin vain pieni kohta äänihuulista kerrallaan koskettaa toisiaan. (Titze 1990.)



**Kuva 5.** EGG-signaalin muoto voi kertoa pystysuunnassa tapahtuvista äänihuulikontaktin muutoksista. Pisteviiva kuvaa äänivärähdyspulssia, jossa äänihuulten keskiosien osuessa yhteen kontaktin määrä kasvaa äkillisesti. Katkoviiva kuvaa puolestaan tilannetta, jossa äänihuulten pystysuunnassa tapahtuva kontakti on vaiheittaista, vain pieni osa äänihuulten massasta koskettaa kerralla toisiaan.

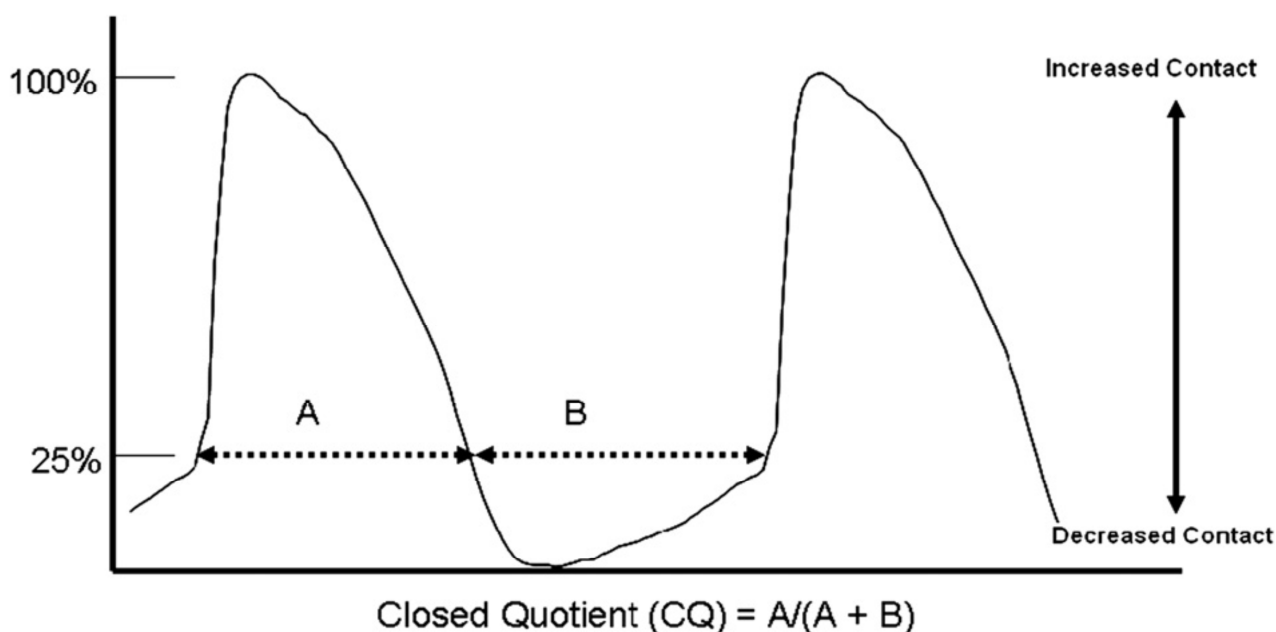
EGG-signaalia tallennettaessa on otettava huomioon, että kaulalla on myös muita kudoksia kuin tarkastelun alla olevat äänihuulet, kuten rasvakudosta ja muita lihaksia, joten virtaus kulkee monen sellaisen kudoksen läpi, jota ei tarvittaisi äänihuulten toiminnan tutkimiseen. Sähkövirta ei myöskään kulje vain elektrodista horisontaalisesti toiseen vaan leviää joka suuntaan, myös vertikaalisesti. Täten kaikki muutokset kurkunpään ja sen ulkopuolen kudoksissa, kuten jonkin lihaksen jännittäminen, saattavat vaikuttavaa syntyvään EGG-signaaliin. Lihaksen jännittyessä sen muoto muuttuu, mikä puolestaan voi muuttaa sähkövirran kulkua ja vaikuttaa sitä kautta EGG-signaaliin. Elektrogloottografeissa ja laryngografeissa on kuitenkin ylipäästösuodatin, jonka avulla on mahdollista eliminoida hitaat liikkeet. Näin lopullisessa versiossa näkyvät vain nopeammat sähköisen impedanssin muutokset eli sellaiset, jotka todennäköisemmin johtuvat äänihuulten värähtelyliikkeistä. (Baken & Orlikoff 2000, 414–415.)

### 2.7.2 Kontaktiaste CQ

EGG:llä tehdyistä mittauksista saadaan laskettua äänihuulten suhteellinen *kontaktiaste* äänihuuliperiodista, *contact quotient CQ*. CQ lasketaan jakamalla aika, jossa äänihuulet kontaktoivat, koko periodin pituudella. Kontaktiaste voidaan ilmaista joko prosentteina tai asteikolla 0–1:een siten, että 0 tai 0 % tarkoittaisi ”ei kontaktia, äänihuulet erillään” ja 1 tai 100% ”täysi kontakti, äänihuulet yhteen puristettuna”. (Scherer, Vail & Rockwell 1995; Baken & Orlikoff 2000, 426; Kankare, Laukkanen, Ilomäki, Miettinen ja Pylkkänen 2012). Äänihuulivärähtelyssä kontaktin määrä on jostain näiden kahden luvun väliltä. CQ-luku 0.45 tarkoittaa, että äänihuulet ovat kontaktissa noin 45 % koko äänihuuliperiodin kestosta.

Kontaktivaiheiden selvittämiseksi voidaan käyttää Rothenbergin ja Mahshien (1988) kehittämää kriteeriestettä, sillä äänihuulten absoluuttisten erkaantumisen ja kontaktoitumisen kohtien määrittä-

minen on vaikeaa tai jopa mahdotonta EGG:n avulla. Kriteerieste tarkoittaa määriteltävää kynnystä tai osuutta signaalin amplitudin huippujen välillä (*peak-to-peak amplitude*) (ks. kuva 6), ja kriteeriesteen ja signaalin risteymäkohdat määrittävät suhteellisen avautumis- ja sulkeutumisvaiheen alkuhetken (Herbst & Ternström 2006). Yleisimmin käytettyjä kriteeriesteitä ovat esimerkiksi 25, 35 ja 50 prosenttia. Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että kriteeriesteellä 25 % saadut tulokset näyttäisivät olevan luotettavia äänenlaatua ja fonaatiotyyppiä tutkittaessa, sillä silloin perustaajuuden tai äänenpainetason muutokset eivät näy CQ:ssa (Kania, Hans, Hartl, Clement, Crevier-Buchman, Brasnu 2004). Myös Herbst & Ternström (2006) ovat todenneet kriteeriesteiden 20 ja 25 prosenttia vastaavan parhaiten lauluäänestä videokymografialla saatuja tuloksia ja soveltuvan siten parhaiten kontaktiasteen mittaamiseen. Yleisesti ottaen, mitä suurempaa kriteeriestettä käytetään, sitä pienempi CQ:n arvo saadaan. Siksi on tärkeää, ettei eri kriteeriesteillä mitattuja CQ-arvoja vertailla keskenään tai käytetä sekaisin.



**Kuva 6.** CQ:n laskentatapa käyttäen kriteeriesteenä 25 %:a. Kuvassa jana A kuvaa äänihuuliperiodin kontaktivaihetta ja B äänihuuliperiodin avaumavaihetta. CQ saadaan laskettua jakamalla janan A pituus janojen A ja B (=koko äänihuuliperiodi) yhteenlasketulla pituudella. (Kuva: Scherer ym. 1995.)

CQ:n kasvu voi kertoa äänihuulia lähentävien lihasten lisääntyneestä aktiviteetista kurkunpäässä. Kontaktiaste on suuri esimerkiksi puristeisessa äänentuottotavassa, jolloin äänihuulet ovat painautuneena toisiaan vasten liiallisesta lihastyöstä johtuen. CQ kasvaa myös silloin, kun ääntä voimistetaan. Tällöin äänihuulet aukeavat laajemmalle ja sulkeutuvat tiiviimmin ja nopeammin. (Laukkanen

& Leino 1999). Kontaktiasteen pieneneminen kertoo puolestaan siitä, että äänihuulet eivät osu kunnonla yhteen. Näin voi käydä esimerkiksi hiljaista tai huokoista ääntä tai falsettia tuottaessa. CQ:n lasku voi johtua myös siitä, että äänihuulten välissä on positiivista ilmanpainetta esimerkiksi ääntöväylän pidentämisen tai puolisolun muodostamisen yhteydessä. (Titze ym. 2002.)

Myös miesten ja naisten kontaktiasteissa on eroja. Tämä johtuu kurkunpäässä olevista eroista. Miesten äänihuulet ovat useimmiten enemmän neliskanttisen muotoisia pystysuunnassa ja naisten äänihuulet muistuttavat useimmiten enemmän kolmiota tai kiilaa. Eri muodoista johtuen miehillä on usein hieman suurempi CQ-arvo kuin naisilla. (Titze 1989; Higgins & Schulte 2002.) Lisäksi niin sanottu takakolmiovuoto, jossa äänihuulten taaimmat kolmannekset eivät osu yhteen, on tyypillistä monelle naiselle (Biever & Bless 1989; Sodersten & Lindestad 1990). Tämä vaikuttaa myös EGG-signaaliin ja sen muotoon, kun äänihuulet eivät missään vaiheessa ole täysin kiinni toisissaan (ks. Hertegård & Gauffin 1995).

Kankare ym. (2012) ovat tutkineet kontaktiasteiden viitearvoja eri puheäänten äänenlaaduille, kun käytetään keskustelupuhevoimakkuutta. Heidän tutkimuksessaan eri äänenlaatuojen tyypilliset CQ-arvot 25 % kriteeriatetta käyttäen olivat naisilla: vuotoinen 0.44, normaali 0.54 ja puristeinen 0.66. Higginsin ja Schulten (2002) tutkimuksessa puolestaan naisten keskimääräinen kontaktiaste oli 0.58 ja miesten 0.60 25 %:n kriteeriatteella mitattuna. Orlikoffin (1991) tutkimuksessa miesten keskimääräinen kontaktiaste oli 0.57. Verdolinin, Drukerin, Palmerin ja Samawin (1998) tutkimuksessa vuotoinen oli 0,46 ja puristeinen 0,57, tosin 35 % kriteeriatteella mitattuna. Yhteenvetona voidaan sanoa, että alle 0.45 oleva CQ kertoo huokoisesta eli hypofunktionaalista ääntötavasta ja yli 0.6 kertoo puristeisesta eli hyperfunktionaalista ääntötavasta. 0.45:n ja 0.6:n väliin jäävät CQ:n arvot vastaavat niin sanottua normaalia, ei liian huokoista eikä liian puristeista, ääntötapaa.

### 2.7.3 Kontaktiaste putkiharjoittelussa

Ajatuksena on, että resonanssiputki ohjaisi äänihuulia kohti ääntöbalanssia, mikä tarkoittaisi optimaalista äänihuulten kontaktia suhteessa subglottaaliseen paineeseen. Pääasiassa kontaktiaste näyttäisi kuitenkin kasvavan resonanssiputkiharjoittelun myötä. Esimerkiksi Laukkasen (1992a; b) tuloksista on nähtävissä, että sekä EGG-signaalin amplitudi että SQ (speed quotient) näytti kasvavan ja QOQ (Quasi-open-quotient) puolestaan pienenevän. EGG-signaalin amplitudin kasvu kertoo siitä, että äänihuulien kontaktin määrä kasvaa, kasvanut SQ kertoo puolestaan äänihuulten nopeasta sulkeutumisesta suhteessa avausvaiheeseen. QOQ kuvaa aikaa, jonka äänihuulet ovat erillään toisistaan. Tutkimuksessa luku pieneni, mikä kertoo äänihuulten olleen pidempään kontaktissa putkiään-

nön aikana. QOQ:n käänteinen luku on QCQ (quasi-closed quotient), joka vastaa melkein kontaktiastetta CQ. Kaikki kolme lukua kuvastavat äänihuulten kontaktin määrää, mutta laskutapa on vain hieman erilainen. QOQ:ssa ja QCQ:ssa ei määritetä kriteeriastetta signaalin amplitudista, vaan raja-kohta eli nollaviiva asetetaan niin, että rajan ylä- ja alapuolelle jäävien signaalin aaltomuodon pinta-alat ovat yhtä suuret. (Hacki 1989; 1996.)

Gaskill ja Erickson (2010) tutkivat yhden minuutin kestoisen resonanssiputkiharjoittelun vaikutuksia CQ:hun mutta eivät löytäneet mitään selkeää tendenssiä CQ:n vaihtelulle. Osalla tutkimukseen osallistuneista henkilöistä CQ:n arvot nousivat harjoittelun jälkeen ja osalla ne taas laskivat. Tutkijat arvioivat tulosten suuren variaation mahdollisiksi syiksi esimerkiksi osallistujien kokemattomuuden kyseisen harjoituksen tekemisessä, yksilölliset erot kurkunpään lihasten jännittyneisyydessä, adduktiossa ja kurkunpään korkeudessa, tai mahdollisen tarkoituksettoman sovittumattomuuden (mis-match) ääniraon ja pidennetyn ääntöväylän välisessä impedanssissa.

Muutaman vuoden jälkeen julkaistussa artikkelissa tutkijat toteuttivat saman harjoituksen mutta tällä kertaa niin, että ryhmä oli jaettu kokeneisiin ja kokemattomiin ääniharjoituksen tekijöihin. Tämän lisäksi mittaukset tehtiin kahteen kertaan niin, että ensimmäisellä kerralla osallistujat eivät saaneet mitään ohjeita siitä, kuinka resonanssiputkea pitäisi pidellä ja millaisiin tuntemuksiin olisi hyvä pyrkiä. Toisella mittauksella tutkijat antoivat heille ohjeet. CQ näytti pääosin kasvavan molemmissa ryhmissä putkiäännön aikana huolimatta siitä, oliko ohjeet annettu vai ei. Muutamalla koehenkilöllä CQ kuitenkin laski ja kolmella se pysyi muuttumattomana. Putkiäännön jälkeen tehdyissä mittauksissa henkilöiden CQ-arvot näyttivät palaavan lähemmäs lähtökohdan arvoja, eikä CQ:ssa ollut nähtävissä niin suurta vaihtelua kuin putkiäännön aikana. Seitsemällä osallistujalla CQ kuitenkin kasvoi putkeen ääntämisen jälkeen ja kymmenellä osallistujalla säilyi sama tendenssi CQ:ssa kuin mitä oli saavutettu putkiäännön aikana, oli se sitten ollut CQ:n lasku tai kasvu. Nämä kymmenen henkilöä, eli puolet osallistujista, onnistuivat siis mahdollisesti säilyttämään lähes samat asetukset ääntöväylässä kuin mitkä olivat muokkautuneet putkiäännön aikana impedanssin yhteensovittumisen aikaansaamiseksi. (Gaskill & Quinney 2012.)

Koska edellä mainitut tutkimukset ovat terveillä osallistujilla tehtyjä, on todennäköistä, että CQ:n kasvu kertoo enemmänkin äänihuulten muodon muuttumisesta ja ainoastaan kiinteämmästä äänihuulikontaktista kuin äänentuoton muuttumisesta hyperfunktionaaliseksi (ks. Titze 1990). Gaskillin ja Quinneyn (2012) tutkimukseen osallistui laulajia, joiden CQ oli 0.6 tai enemmänkin sekä ennen putkiääntöä että sen aikana. Jos sitä vertaa puristeisen äänen viitearvoihin (ks. luku 2.7.2), kyseinen ääni voitaisiin määritellä puristeiseksi. Laulajilla korkeampi CQ ei kuitenkaan ole poikkeuksellista,

sillä laulussa tarvittavaa suurempaa keuhkojen ilmanpaineen määrää täytyy kompensoida tiukemalla äänihuulten adduktiolla (Gaskill & Quinney 2012). Näin ollen, kun kyseessä on ollut terveäänisiä henkilöitä, äänentuottotapa voi olla tiiviimpi olematta kuitenkaan puristeinen. Varsinkin, jos subjektiivisena kokemuksena on, että putkeen ääntäminen tuntuu miellyttävämmältä kuin sitä ennen tehty ääntö. Toisaalta, Titzen (1988) mukaan optimaalisin voimakkuus saavutetaan, jos äänihuulet ovat hieman erillään tai koskettavat toisiaan vain kevyesti (kuitenkin koko äänihuulten mitalta). Jos tarkoituksena on saada putken avulla pidennetty ääntöväylä avustamaan äänihuulivärähtelyä, ja jos kerran putkeen ääntämisen jälkeen äänenpainetaso kasvaa (Laukkanen ym. 2012; Vampola ym. 2011), voisi myös olettaa, että kontaktin määrä jopa hieman vähenisi putkeen ääntämisen myötä. Näin ei kuitenkaan näyttäisi olevan. Laukkasen, Linholmin ja Vilkmanin (1995a) tutkimuksessa lisäksi ainakin naisilla lihasten aktivaatio näytti kasvavan putkeen ääntämisen jälkeen tuotetussa vokaaliäännössä. Miehillä se sen sijaan näytti laskevan.

Kun putken resistanssi on tarpeeksi suuri eli kun valitaan tarpeeksi kapea putki tai pilli, CQ näyttäisi laskevan (Titze ym. 2002; Guzman ym. 2013). Tällöin äänihuulten yläpuolelle ja äänihuulten väliin muodostuu sen verran painetta, etteivät äänihuulet mene kiinni yhtä tiukasti. Tämä tendenssi ei kuitenkaan aina välttämättä päde, sillä esimerkiksi Titzen ym. (2002) tutkimuksessa osallistujana olleen tenorin CQ nousi äännettäessä pilliin matalimmalta sävelkorkeudelta. Yksilöt saattavat siis reagoida eri tavoin putken myötä kasvaneeseen kuormaan. Kyseessä voi olla myös ero laulun ja puheen koulutuksen perinteiden välillä, mikä voi vaikuttaa reagoititapaan.

### 3 Tutkimuskysymykset

Saaduista näytteistä on tarkoitus tutkia

1. Onko vokaaliäännön ja ilmaan tai veteen tehdyn putkiäännön välillä nähtävissä muutos kurkunpään ääntöväylän koossa?
2. Aiheuttaako putkeen ääntäminen muutoksia äänihuulten kontaktissa? Jos aiheuttaa, niin mihin suuntaan kontaktiasteen suuruus muuttuu verrattuna vokaaliääntöön, kun putki on ilmassa ja toisaalta, kun putki on vedessä?
3. Onko mahdollisten muutosten määrissä eroa harjoitteiden (ilma / putki) välillä?
4. Ovatko eri harjoitteiden aikaansaamat muutokset samansuuntaisia kaikilla henkilöillä vai onko osallistujien välillä havaittavissa eroja?

## 4 Tutkimusmenetelmät ja osallistujat

### 4.1 Osallistujat

Osallistujina toimi vokologeja ja vokologian opiskelijoita, joista kaikki olivat naisia. Nämä henkilöt valittiin, sillä heillä on kokemusta kyseisten harjoitteiden tekemisestä. Näin ollen harjoitukset suoritettiin todennäköisemmin niin, että harjoitus tapahtui tavoitellulla tavalla. Osallistujia oli alussa yhdeksän, mutta kahden osallistujan nasofiberoskopinen tutkimus ei onnistunut anatomisista syistä. Lopulta seitsemän henkilön näytteistä tehtiin mittaukset. Näistä seitsemästä kolme (3) oli vokologeja ja muut vokologian opiskelijoita. Kyseisiä ryhmiä päätettiin tarkastella myös erikseen. Vokologian opiskelijoista yhdellä oli kuitenkin pitkä lauluharrastustausta, ja hänellä oli muita opiskelijoita enemmän kokemusta putken käyttämisestä. Niinpä hänet päätettiin laskea mukaan ”kokeneiden” putkiharjoittelijoiden ryhmään yhdessä vokologien kanssa. Osallistujat olivat iältään 21–52 vuotta.

### 4.2 Näytteet

Tässä tutkimuksessa tarkastelun kohteena oleva harjoitus oli yhtenä osana useammasta puolisolkuharjoitteesta ja putkiharjoitteesta koostuvaa sarjaa. Alkunauhoitus koostui vokaaliäännöistä ja puolisolkuäännöistä. Osallistujat tekivät ensin vokaaliääntöä [a:] [i:] [u:], jotta saatiin kuva tavanomaisista kurkunpään asennoista. Tämän jälkeen tallennettiin bilabiaalinen v [β:] ja [m:].

Alkunauhoitusten jälkeen osallistujat harjoittelivat n. 2 min ääntämällä resonanssiputkeen. Resonanssiputkena käytettiin tässä tutkimuksessa Antti Sovijärven kehittämää lasista putkea, jonka sisähalkaisija oli 8mm, ulkohalkaisija 9 mm, pituus 27 cm ja sisäosan poikkipinta-ala noin 0,5 cm<sup>2</sup>. Resonanssiputkeen äännettäessä jokaista osallistujaa kehoitettiin hakemaan mahdollisimman hyviä värinätuntemuksia erityisesti huulten ja poskien alueelle.

Tämän jälkeen vokaaliäännöt toistettiin. Niiden lisäksi osallistujat tekivät vokaaliääntöä ja asettivat välissä resonanssiputken suullensa. Näistä vokaali- ja putkiääntöjen yhdistelmistä saatiin aineisto tähän tutkimukseen. [u:]-ääntö, huulet työnnettynä eteen, muistuttaisi eniten putkeen ääntämistä, mutta se aiheutti ongelmia kuvantamisen kanssa. Kieli saattoi liikuttaa skoopin asentoa niin, ettei kurkunpäästä voinut nähdä. Tämän vuoksi suurin osa osallistujista toisti pidennetyn [i:]-äänteen. [i:]tä on käytetty myös aiemmissa tutkimuksissa samasta syystä (esim. Yanagisawa ym. 1989). Storyn (1996) tutkimuksen magneettiresonanssikuvissa oli nähtävissä, että kurkunpään ääntöväylä pysyy lähes muuttumattomana vokaalista toiseen. Näin ollen vokaalin ei pitäisi vaikuttaa kurkun-



pään ääntöväylän kokoon merkittävästi. Tähän tutkimukseen valittiin yksi ääntö niin, että resonanssiputki oli ilmassa ja yksi ääntö niin, että resonanssiputken suu oli n. 2 cm:n syvyydessä. Yhtenä kriteerinä oli lisäksi se, että vokaaliääntö ja putkiääntö tapahtuisivat saman uloshengityksen aikana, jolloin voitaisiin minimoida kameran liikkumisen vaikutus mitattavaan pinta-alaan.

Vesimukiin ääntäminen otettiin mukaan ilmaan tehdyn putkiäännön lisäksi, sillä vettä käytetään usein ääniterapiassa ja veden avulla saatiin kasvatettua harjoituksen vastuksen määrää.

#### 4.3 Kurkunpään kuvantaminen

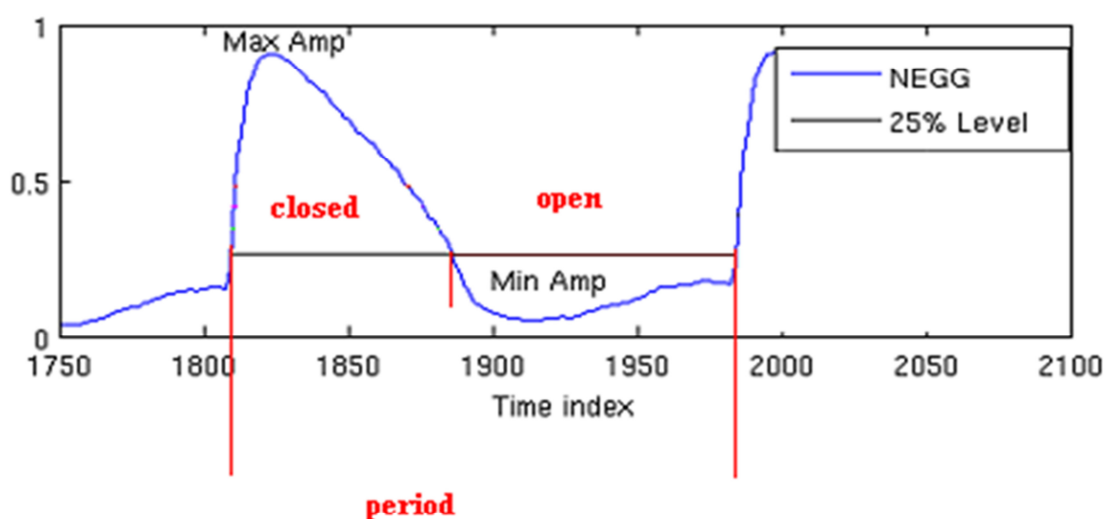
Harjoitukset tehtiin Helsingin foniatriksen poliklinikan tutkimushuoneessa, ja tutkimuksen suoritti kokenut foniatri. Nasofiberoskopiakuvantamisessa käytettiin rpScene®-Video film documentation system -laitteistoa, 17":n värinäyttöä, värikameraa malliltaan Timcke CSG, valostroboskooppia Timcke KS4200s sekä rhinolaryngoskooppia Olympus ENF-P4. Kaulalle asetettiin myös mikrofoni, jonka avulla mitattiin äänenvoimakkuutta ja sävelkorkeutta. Skooppi oli nielussa koko tutkimuksen ajan, myös kahden minuutin resonanssiputkiharjoittelun aikana. Tutkimuksen yhteydessä ei käytetty puudutusta.

#### 4.4 Äänihuulten kontaktiasteen (CQ) mittaaminen

Kurkunpään kuvantamisen yhteydessä tallennettiin lisäksi EGG-signaali. Tarkoituksena oli, että jos nasofiberoskopiassa nähtäisiin muutoksia, EGG:n avulla voitaisiin selvittää, aiheuttaako se samalla muutoksia äänihuulivärähtelyssä. Elektrodit asetettiin kaulalle kurkunpään molemmiin puolin tarralla kiinnitettävän pannan avulla. Nauhoituksissa käytettiin kaksikanavaista elektroglossografia (Glossal Enterprises, taajuuden alaraja asetettuna 20Hz:iin) ja pääpantamikrofonia (AKG C477), jossa oli kannettava virtalähde (AKG B29L). Mikrofonit asetettiin kuuden (6) cm:n päähän koehenkilön huulista. Näytteet tallennettiin käyttäen apuna kannettavaa tietokonetta ulkoisella äänikortilla (M-AUDIO, MOBILEBRE USB). Tallennusohjelmana käytettiin Sony Sound Forge 7.0 -ohjelmaa. Näytteenottotaajuus oli 44,1 kHz ja kvantisaatio (amplitudin vaihteluväli) 16 bittiä. Elektroglossografi-tallenteet sisälsivät akustisen signaalin ja EGG-signaalin, jotka leikattiin lyhyemmiksi osioiksi Sony Sound Forge 7.0 -ohjelmassa.

Tämän jälkeen EGG-signaalin kontaktiasteet mitattiin GNU Octave 3.6.0 (John W. Eaton 2011) -ohjelmalla, sillä siten saadaan laskettua CQ usealla eri tavalla. EGG-signaali muutettiin NEGG:ksi, eli amplitudiltaan normalisoiduksi EGG-signaaliksi (ks. Kuva 7). Valitsimme tähän tutkimukseen

käytettäväksi kriteeriateen 25 %, koska sen on todettu olevan luotettava kriteeriate CQ:ta tutkittaessa puheäänessä. (Kankare ym. 2012). CQ mitattiin samasta kohdasta kuin mistä vokaaliääntöjen ja putkiääntöjen nasofiberoskopiakuvat olivat. EGG-analyysiin käytettiin Dong Liun (2012) kirjoittamaa ohjelmasovellusta, joka tekee amplitudinormalisoinnin, ottaa signaalista ensimmäisen derivaatan ja sen jälkeen laskee siitä esimerkiksi valituilla kriteeriateilla CQ:n keskiarvon automaattisesti. Tämän ohjelman etu verrattuna toisiin ohjelmiin on se, että kun mitataan kontaktiaste pidemmältä väliltä ja otetaan siitä keskiarvo, saadaan todennäköisesti luotettavampi tulos kuin mitä saataisiin, jos mitattaisiin kontaktiaste vain yhdestä äänihuuliperiodista.



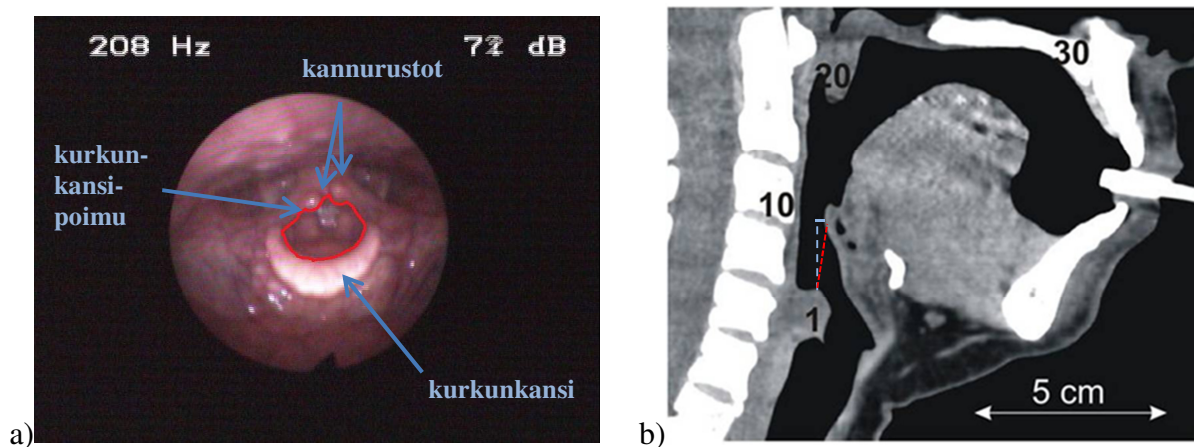
**Kuva 7.** CQ-analyysit tehtiin käyttäen Octave-ohjelmaa. CQ:ta laskiessa käytettiin kontakti- ja aukiolovaiheen määrittämiseen 25 %:n kriteeriatesta.

#### 4.5 Kurkunpään ääntöväylän koon mittaaminen

Kurkunpään ääntöväylään liittyvät mittaukset tehtiin nasofiberoskopiavideoista saaduista kuvista. Videoista otettiin Print Screen -toiminnolla 2D-kuva, joka siirrettiin kuvankäsittelyohjelmaan, missä ylimääräiset osat kuvan reunoilta rajattiin pois. Rajaaminen suoritettiin kaikkien kuvien kohdalla samalla tavoin. Vertaamalla rajattua ja rajaamatonta kuvaa vierekkäin voitiin varmistua siitä, etteivät mittasuhteet kuvassa olleet muuttuneet rajauksen myötä. Pinta-alan mittaamisessa käytettiin apuna ImageJ- ohjelmaa (Image Processing and Analysis in Java, Richard Stallman 1986). Kuvasta rajattiin kurkunpään ääntöväylän suuaukoksi määritelty alue. Alue rajattiin niin, että edessä rajana

oli kurkunkansi, sivuilla kurkunkansipoimu (aryepiglottic fold) ja takana kannurustot. Näytteet valittiin sillä perusteella, että kamera pysyi niissä mahdollisimman tarkasti paikoillaan, siis siten, ettei kamera heilahtanut esimerkiksi kielen liikkeen vuoksi. Näin pinta-alan suhteellinen muutos saatiin luotettavammin laskettua. Tämä ei kuitenkaan poistanut sitä mahdollisuutta, että kurkunpään lasku voisi saada kurkunpään ääntöväylän näyttämään kaventuneelta, kun sen etäisyys kameraan kasvaisi. Jos kuitenkin muut rakenteet kurkunpäässä näyttävät yhtä suurilta putkeen äännettäessä kuin sitä ennen, mahdollisen kaventumisen havaitseminen ei voi olla pelkästään kuvattavan kohteen laskusta tai skoopin noususta johtuvaa. Pinta-alan muutos on suhteellinen ja muutoksia verrataan prosentteina, koska kuvasta ei voitu mitata rakenteiden kokoa esimerkiksi senttimetreinä.

Kuvassa 8a on kuvattuna kohta, jota mitattiin. Koska eturajana toimi kurkunkannen reuna, ei mitta-uskohta ole täysin vastaava kurkunpään ääntöväylän ylärajan (ks. kuva 1) kanssa. Jos kurkunkansi kuitenkin taittuu taaksepäin putkiäännössä ja kaventaa näin mitattavaa alaa, voidaan päätellä, että myös itse kurkunpään ääntöväylä kaventuu, vaikka sen eturaja olisikin hieman matalammalla. Kurkunkansi taittuu kuitenkin koko pituudeltaan ja kurkunkannen alempi osa toimii kurkunpään ääntöväylän seinämänä.



**Kuva 8.** a) kurkunpään ääntöväylä ylhäältä päin kuvattuna ja b) vastaava kohta sivusuunnasta arvioituna. b-kohdan punainen katkoviiva vastaa samaa kohtaa kuin a-kohdan punainen alue, sininen kiinteä viiva on mitattu alue normalisoituna vaakasuoraan. (Alkuperäinen kuva b: Vampola ym. 2011.)

#### 4.6 Mittausvirheen arviointi

Pinta-aloja mitattaessa tutkijan täytyi itse määritellä kuvasta kurkunpään ääntöväylän rajat. Yksittäisten virheiden poissulkemiseksi kolme tutkijaa mittasi pinta-alat kustakin näytteestä, ja näistä mittaustuloksista otettiin keskiarvo. Ennen mittauksia varmistettiin, että kaikilla tutkijoilla oli sama käsitys mitattavasta alasta ja sen rajoista, jolloin voitiin varmistua mittaustavan yhtenäisyydestä.

Lisäksi yksi tutkija mittasi pinta-alat kahteen kertaan, ja näiden kahden kerran lukujen erotus laskettiin. Jotta voitaisiin sanoa, että näytteiden välillä oleva ero on todellinen, kahden mittauskerran tuloksen erotuksen täytyy olla pienempi kuin tutkimuksen kohteena olevan kahden eri näytetyypin (vokaaliääntö/putki) välinen erotus.

#### 4.7 Taulukot

Tulokset-osion taulukot saatiin käyttämällä Microsoft Excel 2010 -taulukko-ohjelmaa. Vaikka kyseessä ei ole tilastollinen tutkimus, taulukon keskiarvot antavat yleiskuvaan pinta-alan suhteellisen muutoksen ja mittausvirheen suuruudesta.

## 5 Tulokset

### 5.1 Kurkunpään ääntöväylän pinta-ala

Taulukosta 1 on nähtävissä kunkin osallistujan kurkunpään ääntöväylän suuaukon pinta-alamittauksien tulokset. Osallistujat jaettiin kahteen ryhmään sen mukaisesti, kuinka paljon kokemusta heillä on putkella harjoittelemisesta. Jako tehtiin välille vokologit ja vokologian opiskelijat, mutta koska yhdellä opiskelijalla on pitkä lauluharrastustausta, ja hän on sitä kautta saanut kokemusta putkilla ja pilleillä harjoittelusta, päätettiin hänet tämän vuoksi sisällyttää kokeneisiin putkella harjoittelijoihin. Kokeneilla harjoittelijoilla oli nähtävissä pääosin suurempi kaventuma sekä ilmaan että veteen tehdyissä putkiäännöissä lukuun ottamatta yhden opiskelijan (7<sub>op</sub>) ilmaan tehtyä putkiääntöä.

Taulukossa 1 näkyvät pinta-alat voivat vaikuttaa keskenään hyvin erisuuruisilta. Tämä johtuu siitä, että eri henkilöillä skooppi oli eri korkeudella nielussa. Koska pinta-aloja verrattiin vain saman henkilön näytteisiin, tällä pinta-alojen erolla ei ole merkitystä tuloksiin.

**Taulukko 1.** Osallistujien kurkunpään ääntöväylän suuaukon pinta-alat vokaaliäännöissä ja putkiäännöissä, vokaalin ja putkiäännön pinta-alojen erotus sekä pinta-alojen muutos prosentteina. Osallistujien kokeneisuus on merkitty alaviitteeseen (vok = vokologi, op = opiskelija, op/lau = opiskelija, jolla pitkä lauluharrastustausta).

Osallistuja	Vokaali, $\bar{x}$	Putki ilmassa, $\bar{x}$	Pinta- alojen erotus	Muutos %	Vokaali 2, $\bar{x}$	Putki vedessä, $\bar{x}$	Pinta- alojen erotus	Muutos %
1 <sub>vok</sub>	9454	1531	-7923	-83,8	10074	918	-9156	-90,9
2 <sub>vok</sub>	3138	2489	-650	-20,7	3681	1059	-2623	-71,2
3 <sub>vok</sub>	8936	7535	-1401	-15,7	6422	996	-5427	-84,5
4 <sub>op/lau</sub>	1972	1269	-703	-35,6	4356	1511	-2845	-65,3
5 <sub>op</sub>	6660	7346	687	10,3	7964	5135	-2829	-35,5
6 <sub>op</sub>	7315	6915	-400	-5,5	5965	2892	-3074	-51,5
7 <sub>op</sub>	10225	3282	-6943	-67,9	12217	5593	-6623	-54,2

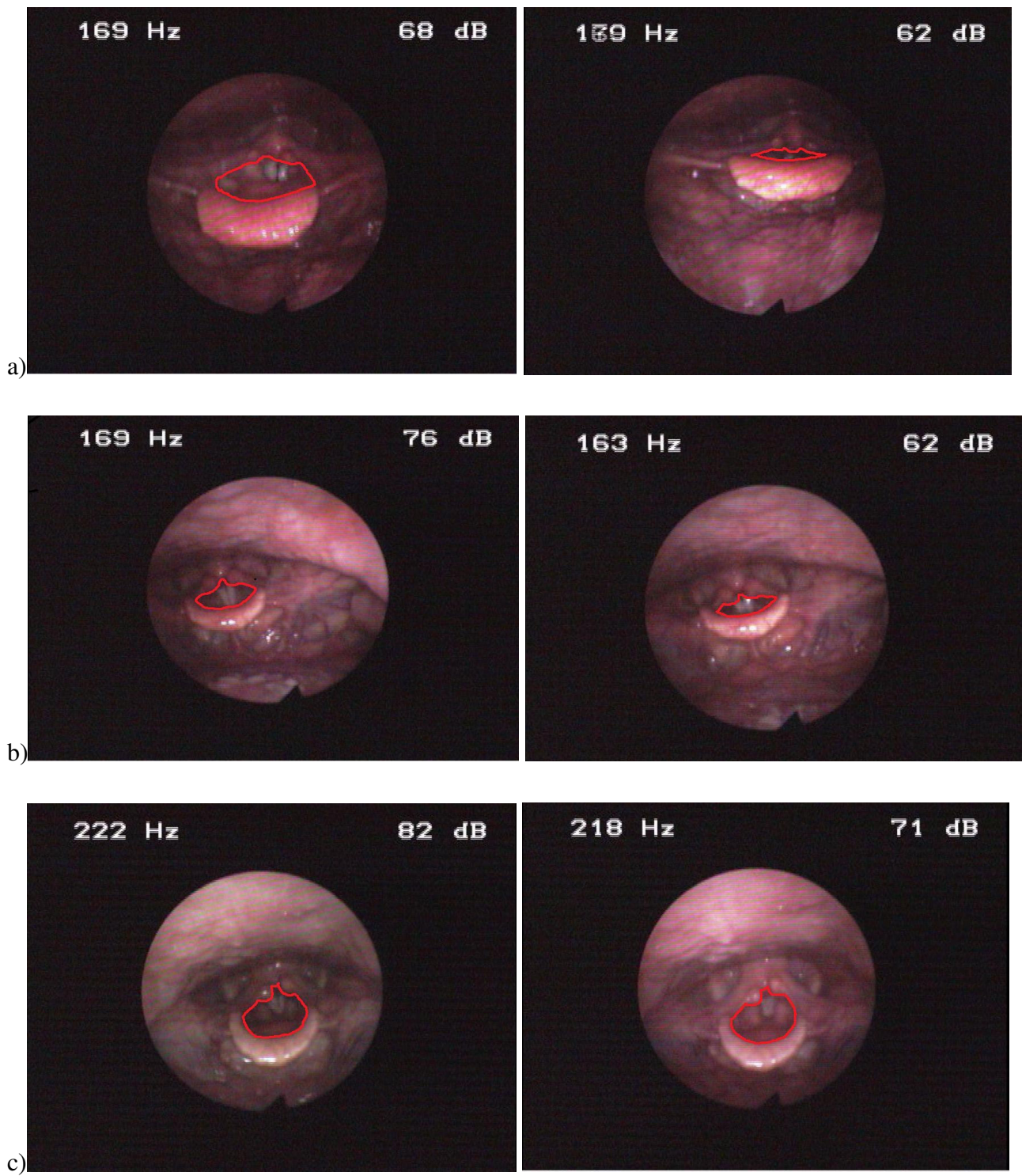
Kurkunpään ääntöväylä pienentyi ilmaan tehdyn resonanssiputkiäännön aikana keskimäärin -31 % ja veteen tehdyn äännön aikana -65 % verrattuna vokaaliääntöön (ks. Taulukko 2). Taulukoista on havaittavissa myös se seikka, että hajonta oli melko suurta osallistujien kesken, erityisesti ilmaan tehdyissä putkiäännöissä. Keskimääräisesti suurimmat kaventumat oli kuitenkin havaittavissa kokeneiden ryhmän osallistujilla. Heillä ilmaan tehdyn putkiäännön aikaansaaman kaventuman keskiarvo oli noin -36 % ja vokologian opiskelijoiden -21 % verrattuna vokaaliääntöön. Ilmaan tehtyjen putkiääntöjen pinta-alojen muutosprosenttien keskiarvoa nostaa kuitenkin muutaman osallistujan erittäin suuri kurkunpään ääntöväylän kaventuminen, jolloin keskimääräinen prosentuaalinen muutos voi vaikuttaa suuremmalta kuin mitä se on. Niinpä onkin kuvaavampaa tarkastella ilmaan tehdyn putkiäännön kohdalla mediaania. Tällöin muutokset ovat -21 % koko ryhmällä, kokeneilla -28 % ja opiskelijoilla -6 %.

Veteen tehdyssä putkiäännöissä vastaavat keskiarvot olivat kokeneilla -78 % ja opiskelijoilla -47 %. Veteen tehtyjen putkiääntöjen ja vokaaliääntöjen välillä tapahtuneissa muutoksissa hajonta ei ollut yhtä suurta osallistujien kesken kuin ilmaan tehdyissä putkiäännöissä.

**Taulukko 2.** Pinta-alojen muutosprosenttien keskiarvo, mediaani ja keskihajonta.

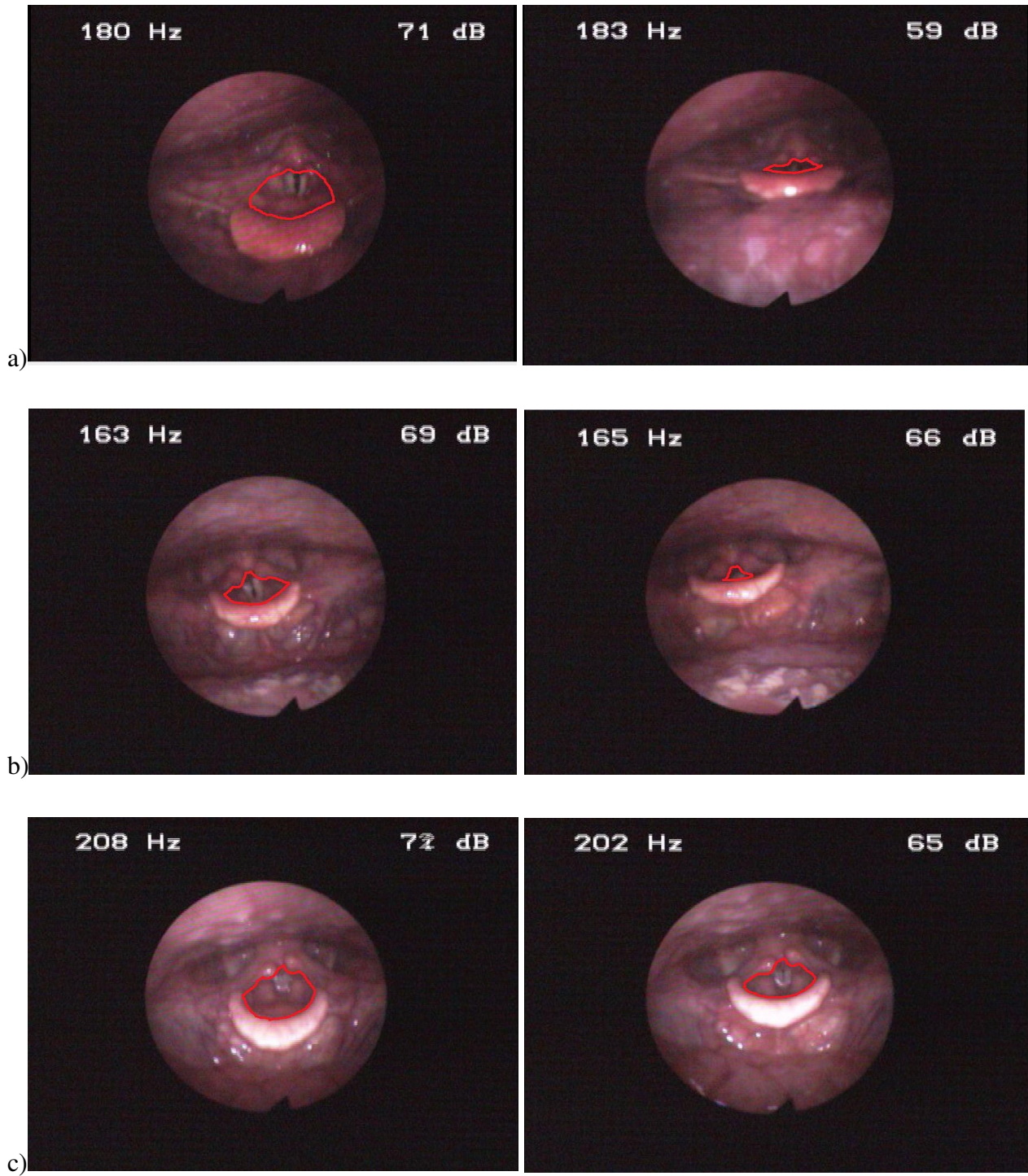
	N	$\bar{x}$	Md	s
Vokaalin ja putkiäännön (ilma) välinen muutos %	7	-31,3	<b>-20,7</b>	33,9
• kokeneet	4	-35,6	<b>-28,1</b>	31,1
• opiskelijat	3	-21,0	<b>-5,5</b>	41,40
Vokaalin ja putkiäännön (vesi) välinen muutos %	7	<b>-64,7</b>	-65,2	19,4
• kokeneet	4	<b>-78,0</b>	-77,9	11,8
• opiskelijat	3	<b>-47,1</b>	-53,4	10,1

Veteen tehdyssä resonanssiputkiäännössä oli vokaaliääntöön verrattuna havaittavissa kaventuma kurkunpään ääntöväylässä kaikilla osallistujilla (ks. Taulukko 1). Myös ilmaan tehdyn resonanssiputkiäännön ja vokaaliäännön välillä oli havaittavissa ero pinta-alassa kuudessa näytteessä. Yhdellä osallistujalla ilmaan tehdyn putkiäännön aikana kurkunpään ääntöväylä oli hieman laajempi, kurkunpään ääntöväylän suuaukon pinta-alan kasvu oli 10,3 % (kuva 9c).



**Kuva 9.** Muutos kurkunpään ääntöväylässä (rajattu punaisella), vasemmalla kuva vokaaliäännöstä ja oikealla kuva putkiäännöstä ilmaan. a) on osallistujan 1<sub>vok</sub>, b) on osallistujan 2<sub>vok</sub> ja c) osallistujan 5<sub>op</sub> kurkunpää.





**Kuva 10.** Muutos kurkunpään ääntöväylässä (rajattu punaisella), vasemmalla kuva vokaaliäännöstä ja oikealla kuva putkiäännöstä veteen. a) on osallistujan 1<sub>vok</sub>, b) osallistujan 2<sub>vok</sub> ja c) osallistujan 5<sub>op</sub> kurkunpää.



## 5.2 Kontaktiasteen muutokset

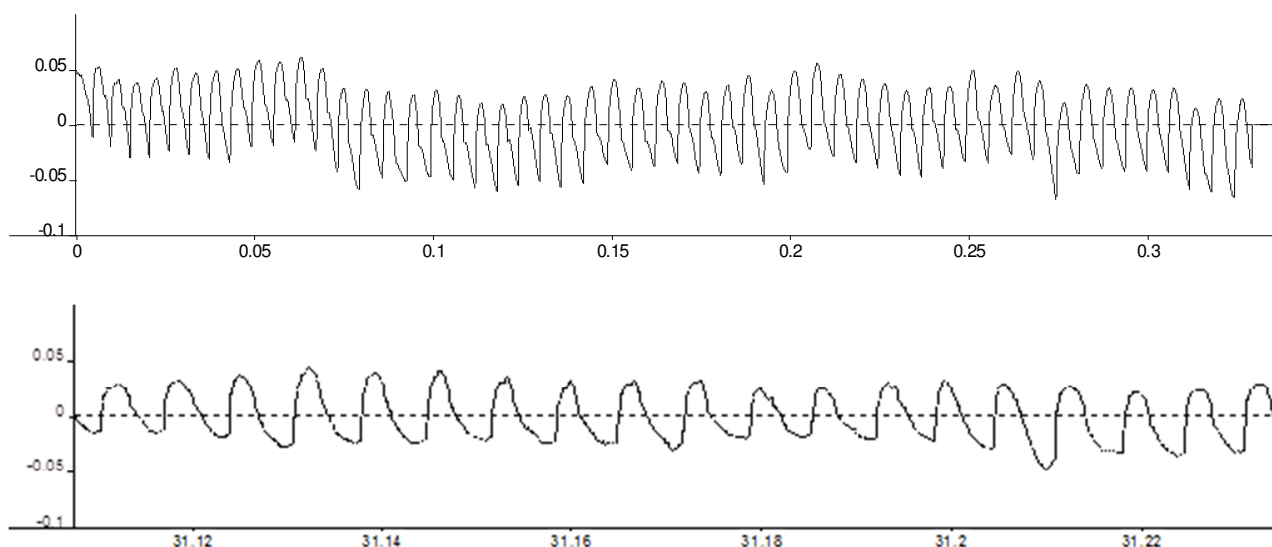
Kontaktiaste onnistuttiin mittaamaan kuudelta henkilöltä. Mittauksessa ilmeni ongelmia, sillä koetilanteessa oli erittäin vaikea vaikuttaa signaalin laatuun ja muuttaa sitä, jos se alkoi näyttää huonolta. Tämä johtui siitä, että kaulalle oli elektrodien lisäksi asetettuna stroboskoopilaitteen mikrofoni. Tästä syystä yhden osallistujan signaalin mittaaminen epäonnistui kokonaan, ja kahden osallistujan signaali heittelehti välillä niin, ettei CQ:ta voinut mitata kaikista kohdista. Signaali heittelehti myös muissa näytteissä, jonka vuoksi osassa täytyi verrata vokaaliääntöä, joka oli tehty ennen putkiääntöä ilmaan, ja veteen tehtyä putkiääntöä toisiinsa. Näin tehtiin osallistujien 3, 4 ja 6 kohdalla. Tämä ei kuitenkaan haitannut, sillä näin saatiin kuitenkin mitattua alkutilanne (vokaali) ja mahdollinen muutos (putki).

Saaduista tuloksista näkyy, että kontaktiaste kasvoi kaikilla osallistujilla, kun putki oli ilmassa. Kun putki oli vedessä, kontaktiaste kasvoi kolmella osallistujalla, yhdellä pysyi samana ja yhdellä piene- ni. Niillä osallistujilla, joilla CQ kasvoi veteen tehdyssä putkiäännössä, oli suurempi CQ veteen tehdyssä putkiäännössä kuin ilmaan tehdyssä putkiäännössä.

**Taulukko 3.** Kunkin osallistujan kontaktiasteet (CQ) eri vaiheissa. Tummanharmaa väri on merkinä kasvaneesta CQ:sta, vaaleammalla harmaalla merkityissä CQ laski tai pysyi samana.

Osallistuja	CQ vokaaliääntö 1	CQ putkiääntö ilmaan	CQ vokaaliääntö 2	CQ putkiääntö veteen
1 <sub>vok</sub>	-	-	-	-
2 <sub>vok</sub>	0,56	0,57	0,56	0,60
3 <sub>vok</sub>	0,51	0,54	-	0,56
4 <sub>op/lau</sub>	0,56	0,62	-	0,67
5 <sub>op</sub>	0,52	0,54	-	-
6 <sub>op</sub>	0,57	0,60	-	0,57
7 <sub>op</sub>	-	-	0,64	0,60

Veteen tehdystä putkiäännöstä oli vaikea mitata yhtä tiettyä CQ-arvoa, sillä se tuntui vaihtelevan veden pulputuksen mukana. Kuvasta 11 näkyy, että veteen tehdyissä putkiäännöissä oli havaittavissa huojuntaa EGG-signaalin ja akustisen signaalin amplitudeissa.



**Kuva 11.** Veteen tehty putkiääntö aiheutti huojuntaa y-akselilla sekä akustisessa signaalissa (yllä) että EGG-signaalisessa (alla).

### 5.3 Mittaustulosten virhemarginaali

Mittaustuloksen pysyvyyden (intrarater reliability) arvioimiseksi yksi tutkijoista teki kurkunpään ääntöväylän mittaukset kahdesti. Koska mitattava kohta piirrettiin tietokoneella hiiren avulla, on luonnollista, että eri mittauskertojen tulokset ovat hieman erilaiset. Tutkijan ensimmäisen ja toisen mittauskerran välillä poikkeama pinta-alassa oli keskimäärin 368 yksikköä. Sen sijaan pinta-alan muutos vokaalin ja putkiäännön välillä oli keskimäärin 1797 yksikköä ja vokaalin ja veteen tehdyn putkiäännön välillä 4653 yksikköä (ks. myös taulukko 1). Pinta-alassa tapahtuvat muutokset putkiäännön ja vokaaliäännön välillä olivat siis huomattavasti suurempia kuin kahden eri mittauskerran välinen vaihtelu. Näin voidaan päätellä, että mitatut muutokset pinta-alassa ovat todellisia eivätkä sattumanvaraisesta mittauksesta johtuvaa.

Taulukosta 4 näkyy kunkin näytteen pinta-alamittausten keskiarvot ja hajonnat. Keskiarvot ja hajonnat on laskettu kolmen tutkijan tekemistä näytteistä. Yhden tutkijan tekemät kaksi mittauskertaa ovat molemmat mukana, jotta keskiarvoista ja hajonnoista saataisiin edustavammat. Tutkijoiden välillä esiintyy hajontaa suurin piirtein saman verran kuin yhden tutkijan kahden eri mittauskerran välillä. Nämä hajonnat ovat kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin vokaaliääntöjen ja putkiääntöjen välillä mitattu ero.

**Taulukko 4.** Kolmen tutkijan mittausten keskiarvot ja hajonnat kurkunpään ääntöväylän suuaukon pinta-alasta (yksi tutkija teki mittaukset kahdesti). Alimmaisella rivillä on näkyvissä hajontojen keskiarvot.

Osallistuja	Vokaaliään- tö, $\bar{x}$	Vokaaliään- tö, s	Putki ilmas- sa, $\bar{x}$	Putki ilmas- sa, s	Vokaaliään- tö 2, $\bar{x}$	Vokaaliään- tö 2, s	Putki vedessä, $\bar{x}$	Putki vedes- sä, s
1 <sub>vok</sub>	9454	1051,7	1530,8	288,1	10073,75	448,04	918,00	249,45
3 <sub>vok</sub>	3138	363,4	2488,5	414,2	3681,00	213,13	1058,5 0	157,31
5 <sub>vok</sub>	8936	478,4	7535,0	359,1	6422,00	191,44	995,50	96,20
7 <sub>op/lau</sub>	1971,75	140,8	1269,0	170,1	4356,00	410,83	1511,2 5	183,91
2 <sub>op</sub>	6659,75	405,9	7346,3	339,5	7963,50	530,24	5134,7 5	529,09
4 <sub>op</sub>	7315	228,2	6915,0	258,3	5965,25	281,29	2891,5 0	373,81
6 <sub>op</sub>	10225	536,6	3282,3	307,8	12216,50	286,70	5593,2 5	481,90
Hajonto- jen kes- kiarvo		457,9		305,3		337,38		295,95

## 6 Pohdinta

### 6.1 Osallistujien ja yksilöllisten tekijöiden vaikutukset

Ääniharjoitukset tehoavat yleensä vain silloin, jos niillä pyritään johonkin. Tulokset eivät ole automaattisia, vaan ne vaativat harjoittelua. Esimerkiksi Gaskillin ja Ericksonin (2010) tutkimuksessa harjaantumattomien osallistujien CQ-tuloksissa ei havaittu systemaattisia muutoksia. Putkiharjoittelu tehoaa myös todennäköisesti eri tavalla eri ihmisiin. Tästä antaa viitteitä esimerkiksi Laukkasen ym. (2007) tutkimus, joissa tutkittiin, miten henkilöt reagoivat, kun olosuhteet muuttuvat ääntöväylässä eripituisten putkien myötä. Tutkimukseen osallistuneiden kahden miehen ja yhden naisen tuloksissa oli variaatiota, niin osallistujien kesken kuin yksittäisen osallistujan tuloksissakin. Tämä kuvastaa tutkijoiden mukaan äänilähteen ja ääntöväylän välisen toiminnan monimutkaisuutta.

Putkiharjoittelun aikana on pyrittävä saamaan aikaan mahdollisimman voimakkaita värinätunteuksia kasvojen alueelle, sillä se toimii todennäköisesti osoituksena sille, että harjoituksella on toivottu vaikutus ääntöväylään ja äänilähteen ja ääntöväylän väliseen suhteeseen. Sillä, oliko putkiääntö tässä tutkimuksessa tarkoituksenmukaisesti tuotettu jokaisen tutkittavan kohdalla, on voinut olla vaikutusta tuloksiin. Tutkittavat oli kuitenkin valittu niin, että kaikilla oli ainakin jonkin verran kokemusta ääniharjoittelusta ja resonanssiputken käytöstä. Tämä vähentää harjaantumattomuuden vaikutusta tuloksiin, vaikkakaan se ei näyttänyt täysin poistavan sitä. Saavutetun kokemuksen määrä on kuitenkin hieman erilainen vokologian opiskelijoilla kuin vokologeilla, mikä voi olla syynä siihen, että vokologit ja laulua harrastanut opiskelija sai aikaan suuremman kaventuman putkiharjoittelun aikana, erityisesti veteen tehdyssä putkiäännössä.

Tämän tutkimuksen osallistujan 5 ilmaan tehdyssä putkiäännössä ei ollut nähtävissä kaventumaa. Tässä voi olla kyse siitä, että putkiäännön aikana ei onnistuttu saamaan aikaan haettuja tuntemuksia ja asetuksia. Äännöt toistettiin kuitenkin useampaan kertaan, jotta osallistujat saivat rauhassa pyrkiä saavuttamaan tavoiteltuja värinätuntemuksia kasvoilla. Näin ollen onkin todennäköisempää, että hänen ääntöväylänsä reagoi eri tavalla kasvaneeseen impedanssiin.

Vaikka tutkimukseen osallistuikin vain naisia, tutkimuksen tulokset voivat hyvin päteä myös miehiin. Laukkasen ym. (1995b) tutkimuksessa nimittäin todettiin, ettei putkiääntöjen paine- ja virtausmittausten tulokset eronneet sukupuolten kesken. Miesten äänihuulten massa on kuitenkin suurempi, joten sen värähtelyn muuttamiseksi voidaan tarvita suurempi ääntöväylän impedanssi. Laukkasen, Vilkmanin ja Laineen (1994) tutkimuksessa ilmassa pidettyyn lasiputkeen ääntäminen ei

saanut aikaan muutoksia miespuolisen osallistujan äänessä, minkä epäiltiin johtuvan siitä, että suurempi äänihuulten massa tarvitsisi suuremman ääntöväylän vastuksen, siis esimerkiksi pidemmän tai kapeamman putken. Tämä riittäisi laskemaan F1:n lähelle sitä sävelkorkeutta, jolla henkilö ääntää. (ks. myös Story ym. 2000.)

## 6.2 Kaventuma kurkunpään ääntöväylässä

Nyt saadut tulokset poikkeavat Vampolan ym. (2011), Laukkasen ym. (2012b) ja Guzmanin ym. (2013) saamista tuloksista, jossa todettiin, ettei putkeen ääntäminen juurikaan aiheuttaisi kaventumaa kurkunpään ääntöväylässä vaan lähinnä kasvattaisi ylempien alueiden pinta-alaa. Guzmanin ym. (2013) tutkimuksessa oli havaittavissa lievä kaventuminen vasta putkeen ääntämisen jälkeen tehdyssä äännössä. Kurkunpään ääntöväylän kaventumisessa ja sitä ylempien tilojen laajentumisessa saavutetaan molemmissa kuitenkin tilanne, jossa kurkunpään ääntöväylän tila jää suhteellisesti monin kerroin pienemmäksi kuin ääntöväylässä ylempänä olevat tilat. Voi siis olla, että sama henkilö voi käyttää tilanteesta ja hetkestä riippuen kumpaakin tekniikkaa hyväkseen sopeutuakseen kasvaneeseen impedanssiin. Tämän selvittämiseksi tarvittaisiin useammalta henkilöltä eri päivinä tehdyt mittaukset, jotta voitaisiin selvittää, onko reagointi useammin samanlainen vai vaihtuuko tekniikka.

Veteen ääntäminen sai aikaan suuremman kaventuman. Putki oli kuitenkin vain noin kahden senttimetrin syvyydessä vedessä, jolloin vastus ei vielä kasva kovinkaan paljon. Se oli kuitenkin riittävästi siihen, että kaikilla osallistujilla tapahtui kaventuminen kurkunpään ääntöväylässä. Myös Guzman ym. (2013) havaitsemat muutokset ääntöväylässä olivat suuremmat, kun impedanssi oli suurempi, eli kun äännettiin kapeaan pilliin hieman leveämmän lasiputken sijaan. Hieman kapeampaa putkea tai vastaavaa pientä vesivastusta käyttäen voitaisiin ehkä saavuttaa kaventuma helpommin. Näin ollen kaventuman muodostaminen voisi onnistua myös sellaisilla henkilöillä, joilla on vain vähän tai ei ollenkaan kokemusta putkilla harjoittelemisesta. Myös Laukkasen ym. (2008) tutkimuksessa äänentuoton taloudellisuutta kuvaava TA-lihaksen ja CT-lihaksen välinen suhdeluku oli suurempi pilliä ja sekoituspilliä käytettäessä kuin lasiputkeen äännettäessä. Veden tai kapeamman putken tuoma impedanssin kasvu voisi hyödyttää erityisesti harjaantumaton pillin tai putken käyttäjää.

Putken myötä kurkunpään yläpuolinen ilmanpaine kasvaa, ja tästä johtuen myös kurkunpää saattaa laskea (Sovijärvi 1969; Simberg ym. 2006; Simberg & Laine 2007). Vaikka tämä ilmiö voikin olla kaivattu lopputulos ääniterapiassa, on myös syytä pohtia, johtuuko nyt havaittu kaventuminen itse

asiassa vain siitä, että kameran ja kurkunpään välinen etäisyys kasvaa. Kuvista 9 ja 10 on kuitenkin nähtävissä, että muut rakenteet näyttäisivät pysyvän lähes samankokoisina, ainoastaan kurkunpään ääntöväylä kaventuu. Tästä voidaan päätellä, että todennäköisesti kyseessä ei ole kasvanut etäisyys kurkunpään ja skoopin välillä vaan todellinen ero kurkunpään ääntöväylän koossa eri vaiheiden kesken.

Vampolan ym. (2011), Laukkasen ym. (2012b) ja Guzmanin ym. (2013) tutkimusten rajoituksena oli, että niissä oli vain yksi tutkittava. Tässä työssä pyrittiin saamaan useamman osallistujan avulla lisäselvyyttä siihen, miten putkiharjoittelu vaikuttaa kurkunpään ääntöväylään. Näiden tutkimusten tuloksia ei kuitenkaan voi suoraan verrata tämän tutkimuksen tuloksiin, sillä tutkimustapa oli erilainen. Vampolan ym. (2011), Laukkasen ym. (2012b) ja Guzmanin (2013) tutkimusten yksi merkittävä havainto oli, että nenäportin sulku tiivistyi. Tämä tutkimus toteutettiin nasofiberoskopian avulla, jolloin skooppi esti nenäportin tiiviin sulkeutumisen. Erilainen kuvantamisväline voi siis osaltaan selittää eron tuloksissa. Yksi tähän tutkimukseen osallistuneista oli nimittäin sama henkilö kuin Vampolan ym. (2011) tutkimuksessa, mutta nyt tehdyssä tutkimuksessa kaventuma oli selvästi havaittavissa. On siis periaatteessa mahdollista, että henkilön kurkunpään ääntöväylän muutokset ovat jonkin verran riippuvaisia nenäportin sulun tiiviydestä. Sillä jos henkilö pyrkii saamaan värähtelytuntemuksia aikaan huulilla mutta samanaikaisesti ilmaa virtaa välttämättä nenästä skoopin takia, on henkilön tällöin todennäköisesti tiivistettävä kurkunpääputken ulostuloaukkoa enemmän.

Toisaalta voi myös miettiä, onko asennolla jotain merkitystä: Vampolan ym. (2011) tutkimus tehtiin MRI-kuvantamista hyväksi käyttäen, joka tarkoittaa, että koehenkilön täytyi olla makuuasennossa. Tämä tutkimus toteutettiin istuen. Kummassakin tilanteessa leuan ja pään asento pyrittiin kuitenkin pitämään hyvänä niin, että ääntöväylä pysyi väljänä ja vapaana ylimääräisistä lihaskiristymisistä. Näin ollen on vaikea kuvitella, että muutos makuuasennosta istumiseen voisi aiheuttaa muutoksia ääntöväylässä tapahtuviin muutoksiin. Traserin, Burdumyn, Richterin, Vicarin ja Echternachin (2013) miestenoreita koskeneessa tutkimuksessa todettiin kuitenkin, että makuuasennossa kurkunpää oli hieman ylempänä ja huulet hieman enemmän eteenpäin työntyneenä kuin seistessä. Muutokset olivat tosin hyvin pieniä ja esimerkiksi leuan, kielen ja kitakielekkeen asennossa sekä huulten avauman suuruudessa ei ollut eroa näiden kahden asennon välillä.

Kaventuman muodostamisen tavoittelu saattaa tuntua joistakin oudolta ajatukselta, sillä perinteisemmin laulu- ja puhepedagogiikassa on pyritty enemmän vapaan väylän ajatukseen. Niinpä kavennuksen tekeminen lihastyöllä voi kuulostaa päinvastaiselta ja jopa haitalliselta. Kaiken lihastyön eliminointi ei kuitenkaan ole tarkoituksellista, sillä esimerkiksi eri äänteitä muodostetaan artikulaa-

tioelimiä liikuttamalla. Niinpä kurkunpään ääntöväylän kaventumista kannattaisikin ajatella lähes välttämättömyytenä tietynlaisen äänenlaadun tavoittamiseksi samoin kuin artikulaatioon tarvittavien lihasten jännittäminen on välttämätöntä eri äänteiden muodostamiseksi. Saman ajatuksen esitti jo aiemmin esimerkiksi Yanagisawa ym. (1989). Kurkunpään ääntöväylän kaventamisen kanssa täytyy olla kuitenkin sillä tavoin varovainen, ettei päädy tekemään ylimääräistä lihastyötä vääriä lihaksia käyttäen. Putkiharjoittelun avulla kaventuma näyttäisi muodostuvan tämän tutkimuksen perusteella automaattisesti niin, ettei sitä tarvitse erikseen ajatella. Näin ollen on todennäköistä, että kaventuman aikaansaamiseksi jännittyvät vain tarvittavat lihakset ja tarvittavan verran suhteessa kasvaneeseen impedanssin määrään.

### 6.3 Mitä kontaktiaste kertoo putkiharjoittelun vaikutuksista?

CQ:n kasvu kertoo äänihuulten kasvaneesta kontaktin määrästä äänihuulten välillä. Tulosten mukaan CQ näyttäisi hieman kasvavan putkeen ääntämisen aikana. CQ:n arvot pysyivät kuitenkin osallistujan 4 putkiääntöjä lukuun ottamatta joko 0.6:ssa tai sen alle, eli kontaktiasteen kasvusta huolimatta äännöt eivät olleet puristeisia (ks. viitearvot CQ:ille esim. Kankare ym. 2012). CQ ei kuitenkaan muuttunut systemaattisesti ääntöväylän impedanssin kasvun (veteen ääntämisen) mukana, vaan osallistujien kesken oli havaittavissa eroja. Putkeen reagoiminen voikin olla yksilöstä kiinni, ja samansuuntaisia tuloksia on saanut myös esimerkiksi Gaskill ja Quinney (2012). Toisaalta niillä osallistujilla, joilla CQ oli kasvanut myös veteen ääntämisen aikana, näytti olevan suurempi CQ veteen tehdyssä putkiäännössä kuin ilmaan tehdyssä putkiäännössä.

Tuloksiin voi vaikuttaa myös se, että EGG-signaalin amplitudissa oli havaittavissa huojuunaa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että veden pulpahtelun myötä ääntöväylän paineet vaihtelivat: ennen pulpahdusta paine on suurempi ääntöväylässä kuin ilmakuplan purkaannuttua. Tämä paineen vaihtelu puolestaan saattaa vaikuttaa kurkunpään vertikaaliseen asentoon ja sitä myötä myös syntyvän signaalin muotoon. Näin ollen voi olla vaikea tulkita veteen tehdyn putkiäännön oikeita CQ-arvoja. Veteen tehdyistä putkiäännöistä olisi ollut hyvä ottaa kaksi eri arvoa, kontaktiaste ennen veden pulpahtamista (todennäköisesti hieman suurempi) ja kontaktiaste pulpahtamisen jälkeen (todennäköisesti hieman pienempi). Tämä ei ollut kuitenkaan mahdollista, sillä CQ:n mittaamiseksi käytettiin kaavaa, joka mittasi CQ:n automaattisesti noin 1–1,5 sekunnin ajalta. Näin ollen veteen tehtyjen putkiääntöjen CQ:t olivat keskiarvoja kontaktiasteesta, joista ei voinut erottaa CQ:ta ennen pulpahdusta ja pulpahduksen jälkeen.

CQ:n kasvaminen putkiääntöjen aikana voi olla myös seurausta lisääntyneestä ilmanpaineesta keuhkoissa. Kasvanut ääntöväylän resistanssi vaatii suuremman ilmanpaineen ja toisaalta myös äänihuulien tiukemman jännityksen, jotta äänihuulivärähtely on mahdollista. Näin ollen, CQ:n arvo ei välttämättä kerrokaan värähtelyn muuttumisesta parempaan tai huonompaan suuntaan, vaan se kuvastaa ainoastaan muuttuneita olosuhteita.

Kontaktiasteen kasvu voi olla merkki myös äänihuulien muodon muuttumisesta putkiäännön aikana. Voi olla, että ääntöväylän ja kurkunpään ääntöväylän inerttiivinen reaktanssi saa aikaan äänihuulien muodon muuttumisen kiilamaisesta enemmän neliskanttista muistuttavaksi. Tällainen äänihuulien muoto auttaa ylläpitämään äänihuulien värähtelyä (Titze 2004; 2006a). Kontaktiasteen kasvu voi siis kuvastaa tehostunutta äänihuulivärähtelyä ja äänihuulikontaktin kasvua pystysuunnassa.

Harjoituksen tehokkuutta pohdittaessa tärkeintä on kuitenkin se, millainen kontaktiaste on harjoittelun jälkeen ja opitaanko putkiharjoittelulla uudet ääntöväylän asetukset. Kyseessä on harjoitusmetodi, jonka avulla on tarkoitus harjoittaa muun muassa ääntöbalanssia. Näin ollen, harjoituksen toimivuutta pohdittaessa tärkeämmäksi tulee se, mitä tapahtuu putkiäännön jälkeen, eli oppiiko henkilö taloudellisemman äänentuottotavan vai ei. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan mitattu kontaktiasteen suuruutta harjoittelun jälkeen, sillä se ei ollut tutkimuskysymyksenä. Jatkotutkimuskohteena se voisi olla kannattavaa mitata. Pysyvien muutosten havaitseminen kontaktiasteessa vaatisi luonnollisesti myös pidemmän harjoittelujakson ja useampia mittauksia. Mittaukset olisi hyvä tehdä niin putkiharjoittelun aikana, välittömästi putkiharjoittelun jälkeen kuin myös spontaanin puheen aikana. Tätäkin on jo jonkin verran tutkittu. Esimerkiksi Vampolan ym. (2011) saamien tulosten perusteella näyttäisi siltä, että muutokset ääntöväylässä säilyvät myös putkella harjoittelun päätyttyä. Myös Laukkasen (1992) tutkimuksessa välittömästi putkiääntöä seuranneessa vokaalissa spektrin kaltevuus pieneni ja signaali–kohina-suhde parani.

#### 6.4 Koeasetelman rajoitukset

Koeasetelma aiheutti vaikeuksia EGG:n mittaamisessa. Ääninäytteen ottaminen kesti kokonaisuudessaan noin 15 minuuttia kultakin henkilöltä, ja elektrodit olivat koko tämän ajan kiinnitettynä kaulalle. Kaulalla pidettiin samanaikaisesti nasofiberoskoopin mikrofonia, ja elektrodien ja mikrofonien samanaikainen mahduttaminen kurkunpäälle oli joissain tapauksissa hankalaa. Elektrodien paikka saattoi siirtyä myös, jos osallistujat olivat liikahtaneet tai jos kurkunpään asento oli laskenut resonanssiputkiharjoittelun aikana. Vaikka EGG-signaalia pyrittiin tarkkailemaan koko ajan, elekt-



rodien asennon korjaaminen ei aina ollut mahdollista. Näin ollen kaikilta henkilöiltä ei saatu selkeää EGG-signaalia, josta kontaktiaika olisi ollut luotettavasti mitattavissa.

Suurimmassa osassa näytteitä tehtiin [i:]-ääntöä ennen putkeen ääntämistä, sillä siten saatiin paras näkymä kurkunpäähän. [u:] muistuttaisi vokaaleista eniten putkeen ääntämistä, mutta siinä kieli tuli helposti kuvattavan alueen eteen, ja se saattoi estää näkymän kurkunpäähän tai peittää siitä osan. Niinpä käytännön syistä oli järkevämpää käyttää [i:]-vokaaliääntöä. Tämän ei pitäisi vaikuttaa saatuihin tuloksiin, sillä Storyn (1996) mukaan eri vokaalit eivät vaikuta kurkunpään ääntöväylän koon.

Lisäksi täytyy ottaa huomioon, että tässä mitattiin kaksiulotteista kuvaa. Se saattaa vaikuttaa jonkin verran tuloksiin. Esimerkiksi kurkunpään ääntöväyläksi määritelty ala oli tässä tutkimuksessa edessä kurkunkannen reuna, sivuilla kurkunkansipoimut ja takana kannurustot. Kannurustot sijaitsevat kuitenkin alempana kurkunpäässä kuin kurkunkansi. Näin ollen kaventumasta voisi saada erilaisen vaikutelman, jos käytettävissä olisi kolmiulotteinen kuvantamismahdollisuus.

## 6.5 Muut putkitutkimukset – vertailtavuus ja yleistettävyys

Eri resonanssiputkitutkimusten tulosten vertailua keskenään vaikeuttaa se, että niissä on saatettu käyttää eripituista tai -paksuista putkea, tai se on ollut eri materiaalista valmistettu. Esimerkiksi Storyn ym. (2000) tutkimuksessa mallinnettiin 10, 30, 50 ja 100 cm pituisten putkien aikaansaamia impedanssimuutoksia. Kaikki putket kasvattivat impedanssin määrää ääntöväylässä, mutta reaktanssin käyrän huippukohta vaihteli pituudesta riippuen. Näin ollen, jos tutkimuksessa on käytetty sellaista putken pituutta, joka ei ole ihanteellinen henkilön ääntöväylän koolle ja käyttämälleen perustajuudelle, se voi vaikuttaa saataviin tuloksiin.

Laukkanen (1992) tutki eripituisten putkien (26 cm- 28 cm) vaikutusta mutta tällainen muutaman sentin ero putken pituudessa ei näyttänyt saavan aikaan merkittäviä muutoksia ilmaan äännettäessä. Tätä suuremmilla pituuseroilla voi kuitenkin olla jo sen verran suuri ero impedanssin määrään, että se voi näkyä tuloksissa. Gaskillin ja Ericksonin (2010) ja Gaskillin ja Quinney (2010) tutkimuksessa käytettiin esimerkiksi 50 cm pitkää putkea, joka on yli kaksinkertainen tässä tutkimuksessa käytetyn putken pituuteen. Heidän tutkimukseen osallistui kuitenkin vain miespuolisia henkilöitä, jolloin 50 cm putken käyttäminen on perusteltua. Storyn ym. (2000) mallinnustutkimuksessa nimittäin todettiin, että 17,5 cm:n ääntöväylämallille (joka on keskimääräinen miehen ääntöväylän pituus) optimaalisin putken pituus on 50 cm, kun putken poikkipinta-ala on 0,5 cm<sup>2</sup>. Tällöin reaktans-

sin huippu sijoittuu 100 ja 200 Hz:n välille, mikä on tyypillinen miesten perustaajuuksien vaihteluväli. Naisten perustaajuus on yleensä kuitenkin korkeampi ja ääntöväylä lyhyempi, jolloin lyhyempi putken pituus riittää. Laukkasen ym. (2007) mukaan, naisen ääntöväylän (15 cm) ja 30 cm putken yhdistelmässä F1:n voidaan arvioida sijoittuvan 194 Hz:iin. Näin ollen noin 30 cm putken käyttö naisosallistujilla toteutetussa tutkimuksessa on perusteltua, sillä silloin reaktanssin huippu osuu naisten yleisimmin käytettyjen sävelkorkeuksien kanssa samalle taajuudelle. Putkien erilainen pituus voi siis myös olla se tekijä, joka tekee tuloksista vertailukelpoisia, kun on käytetty osallistujille todennäköisimmin optimaalista putken pituutta.

Putken materiaalilla sen sijaan ei näyttäisi olevan suurta merkitystä, sillä esimerkiksi pillillä ja lasiputkella on saatu hyvin samansuuntaisia tuloksia (ks. Laukkanen ym. 2012a; Vampola ym. 2011). Putken materiaalia merkittävämpi tekijä näyttää olevan harjoittelijan kokeneisuus harjoitusmetodin käytöstä (Laukkanen ym. 2012a). Näin ollen, kun valitaan materiaalia putkelle, kannattaa miettiä helppokäyttöisyyttä: Valitseeko putken, jota on helppo kuljettaa mukana ja joka kestää, vai sellaisen, joka on esimerkiksi helppo puhdistaa? Vaikka putki siis näyttääkin saavan aikaan joitain muutoksia myös kokemattomammilla osallistujilla, parhaat tulokset saavutetaan pidempiaikaisen harjoittelun myötä. Positiivisten vaikutusten saamiseksi kannattaa valita putki tai putkia, joilla todellakin aikoo harjoitella.

Putken halkaisija näyttäisi aiempien tutkimusten mukaan olevan merkittävin putkia erotteleva tekijä, sillä mitä kapeampi putki, sitä suurempi putken resistanssi, ja sitä selkeämmin ääntöväylän ja ääniraon muutokset ovat havaittavissa (Titze ym. 2002; Guzman ym. 2013). Kapeampi ei kuitenkaan tarkoita aina parempaa, sillä jos putki on liian kapea, putken ja ääntöväylän resistanssi kasvaa suuremmaksi kuin ääniraon resistanssi (Titze ym. 2002). Jos tavoitteena on ääniraon ja putkella pidennetyn ääntöväylän impedanssien yhteensovittuminen, tarvitaan kullekin henkilölle sopivan kapea tai pitkä putki tai sopiva vesivastus. Tämä on yksilöllistä, ja riippuu esimerkiksi henkilön koosta ja ääntöväylän pituudesta. Lisäksi Laukkanen ym. (1995a) havaitsivat, että miehillä kurkunpään lihasaktivaatio laski heidän äännettyään 27 cm pitkään putkeen. Näin ollen, vaikka lyhyt putki ei saisikaan aikaan impedanssin yhteensovittumista, tästä rentouttavasta vaikutuksesta voi silti olla terapeutista hyötyä.

Voisi olla hyödyllistä, vaikkakin se voi olla käytännössä vaikea toteuttaa, tutkia jatkossa suuremmalla osallistujamäärällä useita halkaisijaltaan erikokoisia ja merkittävästi eripituisia putkia apuna käyttäen, millaiset vaikutukset suuren ja toisaalta pienemmän resistanssin putkilla on kurkunpään ääntöväylän kokoon ja äänihuulten kontaktiasteeseen. Aiemmissa tutkimuksissa on esimerkiksi ha-

vaittu, että hyvin ohuisiin, muutaman millimetrin halkaisijaltaan oleviin pilleihin ääntäessä kontaktiaste pysyi lähes samana mieslaulajalla mutta naislaulajalla se laski. Pilliin ääntäessä mieslaulajan ääniraon resistanssi oli hieman suurempi kuin pillin aiheuttama resistanssi ja naislaulajalla ääniraon resistanssi oli hieman pienempi kuin pillin resistanssi. Luultavasti tästä syystä naislaulaja piti hieman leveämmästä pillistä. (Titze ym. 2002.) Sukupuolten välillä ja yksilöiden välillä voi olla eroja, joten olisi hyvä kysyä osallistujien mielipidettä siitä, millaiselta kuhunkin pilliin tai putkeen ääntäminen tuntuu. Sillä kun äännetään putkeen, joka on riittävän pitkä ja/tai riittävän kapea tai jos sen toinen pää laitetaan veteen, äänihuulten yläpuolinen resistanssi kasvaa. Jos henkilö on pienikokoisempi, hänelle lyhyt putki voi tarjota riittävän määrän ääntöväylän ilmanpaineen kasvua, ja vähän isompi putki nostaa jo väylän impedanssia siinä määrin, että äänentuoton jatkamisesta tulee vaikeaa.

Resonanssiputkilla harjoittelusta ei ole tehty kontrolloitua tutkimusta, jossa olisi käytetty vain puhtaasti putkia harjoittelun välineinä. Yksi kontrolloitu tutkimus on Simbergin ym. (2006) tekemä, mutta siinä harjoituksissa käytettiin lisänä aksenttimetodista poimittuja harjoituksia sekä epäsuoraa ääniterapiaa (ääniergonomialuentoja). Olisi tärkeää testata putkiharjoittelun ja -terapian pitkäaikaisia vaikutuksia sellaisilla henkilöillä, jotka eivät ole aiemmin saaneet mitään koulutusta putkien käytössä, ja testata resonanssiputken toimivuutta niin, että asiakkaat saisivat ainoastaan harjoitusta lasiputken avulla. Ideaalina voisi olla kaksi kontrolliryhmää, joista toisen ryhmän jäsenet eivät saisi mitään koulutusta ja toisessa ryhmässä annettaisiin jotain muuta äänikoulutusta tai -terapiaa.

Pitkittäistutkimuksen tekeminen olisi myös sen vuoksi hyödyllistä, että nähtäisiin, tapahtuuko harjoittelun myötä *carry overia* eli siirtovaikutusta. Oppiiko henkilö paremman äänentuottotavan, ja kykeneekö hän siirtämään sen myös arkipäivän äänenkäyttötilanteisiin? Vastausten saaminen näihin tuottaa kuitenkin vaikeuksia, sillä on vaikea saada ihmisiä sitoutumaan harjoituksiin pitkiksi ajoiksi. Erityisesti, jos heillä ei ole erityisiä ongelmia äänen kanssa tai riittävää mielenkiintoa todella kehittää ääntään.

## 7 Johtopäätökset

Aiemmassa kirjallisuudessa (Titze & Laukkanen 2007) on havaittu, että tietokonemallinnuksissa taloudellisin äänentuottotapa saavutettiin, kun resonanssiputkella pidennetyssä ääntöväylämallissa kavennettiin lisäksi kurkunpään ääntöväylän osaa. Tämän tutkimuksen perusteella henkilöt näyttäsivät toteuttavan sitä myös käytännössä.

Nasofiberoskopiakuvia tutkimalla saatiin selville, että resonanssiputkiharjoittelun aikana muodostuu kaventuma kurkunpään ääntöväylään. Kaventuma oli suurempi veteen tehdyn äännön yhteydessä kuin ilmaan tehdyssä äännössä. Ilmaan tehty putkiääntö sai aikaan keskimäärin - 21 % muutoksen kurkunpään ääntöväylän suuaukon pinta-alassa ja veteen tehty putkiääntö keskimäärin -65 % muutoksen. Kaventuma näyttäisi olevan sitä voimakkaampi, mitä suurempi impedanssi ääntöväylässä sijaitsee.

Kaventuman suuruus näyttäisi riippuvan myös osallistujien kokeneisuudesta putken käytössä. Suurimmat kaventumat olivat havaittavissa kolmella vokologilla ja opiskelijalla, joka harrasti laulua. Kun impedanssin määrää kasvatettiin lisäämällä vesivastus, myös hieman kokemattommilla harjoittelijoilla kaventuma oli selkeästi havaittavissa. Tuloksiksi saadut prosenttiosuudet ovat vasta suuntaa antavia, mutta nyt havaittu kaventumisilmiö tukee tietokonemallinnuksella saatua teoriaa (Titze & Story 1997; Titze 2004) siitä, että kurkunpään ääntöväylän kaventuminen lisäisi inertanssin määrää ääntöväylässä ja voisi sitä kautta edistää myös äänentuoton taloudellisuuden saavuttamista. Tuotettujen putkiääntöjen taloudellisuuden toteutumista ei kuitenkaan mitattu tässä tutkimuksessa.

Kontaktiaste CQ näytti kasvavan resonanssiputkeen ääntämisen yhteydessä, mikä voi kertoa tehos-  
tuneesta äänihuulivärähtelystä. Veteen tehdyissä putkiäännöissä kontaktiasteen suuruus vaihteli: osalla CQ kasvoi ja osalla pieneni tai pysyi samana. Tämä johtui todennäköisesti kurkunpään asennon muuttumisesta pystysuunnassa kuplinnan ja paineenvaihtelun vuoksi. Niillä osallistujilla, joilla CQ kasvoi veteen tehdyssä putkiäännössä, näytti olevan hieman suurempi CQ veteen kuin ilmaan tehdyssä putkiäännössä.

## Kirjallisuus

- Baken R, Orlikoff R. Clinical measurement of speech and voice. 2. painos. Singular Publishing: San Diego. 2000.
- Bele I. Artificially lengthened and constricted vocal tract in vocal training methods. *Logopedics Phoniatrics Vocology*. 2005; 30: 34–40.
- Biever D, Bless D. Vibratory characteristics of the vocal folds in young adults and geriatric women. *Journal of Voice*. 1989; 3: 120–131.
- Cain A, Murray D, McClymont L. The use of topical nasal anaesthesia before flexible nasendoscopy: a double-blind, randomized controlled trial comparing cophenylcaine with placebo. *Clinical otolaryngology and allied sciences*. 2002; 27: 485–488.
- Casper J, Brewer D, Colton R. Pitfalls and problems in flexible fiberoptic videolaryngoscopy. *Journal of Voice*. 1987; 1: 347–352.
- Cooper M. Change your voice, change your life. Harper & Row Publishers New York. 1985.
- Denizoglu I. Ses terapisi. (Ses terapilerinin temel felsefesi, fizyopatolojik mekanizmalari, teknik uygulamalari & LAX VOX Ses Terapi Teknigi). Izmir. 2010.
- Detweiler, R. An investigation of the laryngeal system as the resonance source of the singer's formant. *Journal of Voice*. 1994; 8: 303–313.
- Eckers C, Hütz D, Kob M, Murphy P, Houben D, Lehnert B. Voice production in death metal singers. *NAG/DAGA*. 2009:1747–1750.
- Elias M, Sataloff R, Rosen D, Heuer R, Spiegel J. Normal stroboscovideolaryngoscopy: Variability in healthy singers. *Journal of Voice*. 1997; 11: 104–107.
- Estill J, Baer T, Honda K, Harris KS. Supralaryngeal activity in a study of six voice qualities. Teoksessa Askenfelt A, Felicetti S, Jansson E, Sundberg J (toim.). SMAC85 Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference. Julkaisijana the Royal Swedish Academy of Music: Stockholm. 1985: 157–174.
- Fant, G. Acoustic theory of speech production. 2.painos. Mouton & Co., Printers: Hague. 1970.

- Fant G, Lin Q. Glottal source-vocal tract acoustic interaction. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1987; 81: S68.
- Frosh AC, Jayaraj S, Porter G, Almeyda J. Is local anaesthesia actually beneficial in flexible fiberoptic nasendoscopy? *Clinical otolaryngology and allied sciences*. 1998; 23: 259–262.
- Gaskill C, Erickson M. The effect of an artificially lengthened vocal tract on estimated glottal contact quotient in untrained male voices. *Journal of Voice*. 2010; 24: 57–71.
- Gaskill, C, Quinney D. The effect of resonance tubes on glottal contact quotient with and without task instruction: A comparison of trained and untrained voices. *Journal of Voice*. 2012; 26: e79–e93.
- Georgalas C, Sandhu G, Frosh A, Xenellis J. Cophenylcaine spray vs. placebo in flexible nasendoscopy: a prospective double-blind randomised controlled trial. *Clinical otolaryngology and allied sciences*. 2005; 59: 130–133.
- Guzman M, Laukkanen A-M, Krupa P, Horáček J, Švec J, Geneid A. Vocal tract and glottal function during and after vocal exercising with resonance tube and straw. *Journal Voice*. 2013:1–16. Article in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvoice.2013.02.007>. Viitattu 17.5.2013.
- Hacki T. Klassifizierung von Glottisdysfunktionen mit Hilfe der Elektrolottographie. *Folia Phoniatrica*. 1989; 41: 43–48.
- Hacki T. Electrolottographic Quasi-open quotient and amplitude in crescendo phonation. *Journal of Voice*. 1996; 10: 342–347.
- Herbst C, Ternström S. A comparison of different methods to measure the EGG contact quotient. *Logopedics Phoniatrics Vocology*. 2006; 31: 126–138.
- Hertegård S, Gauffin J. Glottal area and vibratory patterns studied with simultaneous stroboscopy, flow glottography, and electrolottography. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1995; 38: 85–100.
- Higgins M, Schulte L. Gender differences in vocal fold contact computed from electrolottographic signals: The influence of measurement criteria. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2002; 111: 1865–1871.

Hirano M & Hartmann HG. Aspects of videostroboscopy in practice. Proceedings of the 20th IALP Congress, Tokyo: The Organizing Committee of the XXth Congress of the International Association of Logopedics and Phoniatics. *Folia phoniatica*. 1986: 38; 307.

Kania R, Hans S, Hartl D, Clement P, Crevier-Buchman L, Brasnu D. Variability of electroglottographic glottal closed quotients: necessity of standardization to obtain normative values. *Archives of Otolaryngology - Head & Neck Surgery*. 2004; 130: 349–352.

Kankare E, Laukkanen A-M, Ilomäki I, Miettinen A, Pylkkänen T. Electroglottographic contact quotient in different phonation types using different amplitude threshold levels. *Logopedics Phoniatics Vocology*. 2012; 37: 127–132.

Karnell M. Synchronized videostroboscopy and electroglottography. *Journal of Voice*. 1989; 3: 68–75.

Laukkanen A-M. About the so called "resonance tubes" used in Finnish voice training practice. An electroglottographic and acoustic investigation on the effects of this method on the voice quality of subjects with normal voice. *Scandinavian Journal of Logopedics and Phoniatics*. 1992a; 17: 151–161.

Laukkanen A-M. An electroglottographic and acoustic investigation on the effects of "resonance tubes" on voice quality. Teoksessa Aulanko R, Lehtihalmes M (toim.). Studies in Logopedics and Phonetics 3. Publications of the Department of Phonetics, University of Helsinki, Series B: Phonetics, Logopedics and Speech Communication 4. Helsingin yliopisto: Helsinki, 1992b: 91–114.

Laukkanen, A-M. On Speaking Voice Exercises. A Study on the Acoustic and Physiological Effects of Speaking Voice Exercises Applying Manipulation of the Acoustic-Aerodynamic State of the Supraglottic Space and Artificially Modified Auditory Feedback. Väitöstutkimus. Acta Universitatis Tamperensis. Ser A vol. 445. Tampereen yliopisto. Vammalan kirjapaino Oy: Vammala. 1995.

Laukkanen A-M, Horáček J, Havlík R. Case-study magnetic resonance imaging and acoustic investigation of the effects of vocal warm-up on two voice professionals. *Logopedics Phoniatics Vocology*. 2012a; 37 (2): 75–82.

Laukkanen A-M, Horáček J, Krupa P, Švec J. The effect of phonation into a straw on the vocal tract adjustments and formant frequencies. A preliminary MRI study on a single subject completed with acoustic results. *Journal of Biomedical Signal Processing and Control*. 2012b; 7: 50–57.

Laukkanen A-M, Leino T. Ihmeellinen ihmisääni. Äänenkäytön ja puhetekniikan perusteet, arviointi, mittaaminen ja kehittäminen. Gaudeamus. Oy Yliopistokustannus University Press Finland Ltd. Tammer-Paino Oy: Tampere. 1999.

Laukkanen A-M, Lindholm P, Vilkman E. Phonation into a tube as a voice training method: acoustic and physiologic observations. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*. 1995a; 47: 331–338.

Laukkanen A-M, Lindholm P, Vilkman E. On the effects of various vocal training methods on glottal resistance and efficiency. A preliminary report. *Folia phoniatrica et logopaedica*. 1995b; 47: 324–330.

Laukkanen A-M, Pulakka H, Alku P, Vilkman E, Hertegård S, Lindestad PÅ, Larsson H, Granqvist S. High-speed registration of phonation-related glottal area variation during artificial lengthening of the vocal tract. *Logopedics Phoniatics Vocology*. 2007; 32: 157–164.

Laukkanen, A-M, Radolf V, Horáček J, Leino T. Estimation of the origin of a speaker's and singer's formant cluster using an optimization of 1D vocal tract model. Proceedings of 3rd Advanced Voice Function Assessment. EUIT Telecomunicación: Madrid. 2009: 1–4.

Laukkanen A-M, Titze I, Hoffman H, Finnegan E. Effects of a semioccluded vocal tract on laryngeal muscle activity and glottal adduction in a single female subject. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*. 2008; 60: 298–311.

Laukkanen A-M, Vilkman E, Laine U. On the effects of supralaryngeal acoustics on vocal function. A study with special reference to voice training with 'resonance tubes'. Teoksessa Friberg A, Iwarsson J, Jansson E, Sundberg J (toim.) SMAC93 Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference: 1993 July 28 August 1; Stockholm. Julkaisijana the Royal Swedish Academy of Music: Stockholm. 1994; 79: 201–205.

Leino T. Long-term average spectrum study on speaking voice quality in male actors. Teoksessa Friberg A, Iwarsson J, Jansson E & Sundberg J (toim.) SMAC93, Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, July 28–August 1, 1993. Julkaisijana Royal Swedish Academy of Music: Stockholm. 1994; 79: 206–210.

Leino T, Laukkanen A-M, Radolf V. Formation of the actor's/speaker's formant: A study applying spectrum analysis and computer modeling. *Journal of Voice*. 2011; 25: 150–158.

Linklater K. Freeing the natural voice. Drama Book Specialists: New York. 1976.



- Miles B, Hollien H. Whither belting? *Journal of Voice*. 1990; 4: 64–70.
- Orlikoff R. Assessment of the dynamics of vocal fold contact from the electroglottogram: Data from normal male subjects. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1991; 34: 1066–1072.
- Pabst F, Sundberg J. Tracking multi-channel electroglottograph measurement of larynx height in singers. *Speech Transmission Laboratory Quarterly Progress and Status Report*. 1993; 2–3: 67–78.
- Rothenberg M, Mahshie J. Monitoring vocal fold abduction through vocal fold contact area. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1988; 31: 338–351.
- Sampaio M, Oliveira G, Behlau M. Investigation of the immediate effects of two semi-occluded vocal tract exercises./ Investiga  o de efeitos imediatos de dois exerc cios de trato vocal semi-ocluido. *Pr -Fono Revista de Atualiza  o Cient fica*. 2008; 20: 261–266.
- Sadolin C. Kokonaisvaltaisen   nenk yt n tekniikka. (suom.) M ntyj rvi J. Shout Publishing: Denmark. 2009.
- Scherer R, Vail V, Rockwell B. Examination of the laryngeal adduction measure EGGW. Teoksessa Bell-Berti F, Lawrence RJ (toim.) *Producing Speech: Contemporary Issues*: for Katherine Safford Harris. AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing. American Institute of Physics. AIP Press: New York. 1995: 269–289.
- Seikel J, King D, Drumright D. *Anatomy & physiology for speech, language and hearing*. 4. painos. Cengage Learning: Delmar. 2010.
- Sihvo M. Terve   ni,   nen hoidon A B C. [In Finnish] (Healthy voice. The A B C for voice care.) Kirjapaja: Helsinki. 2006.
- Sihvo M, Denizoglu I. Workshop: Lax Vox Voice Therapy Technique I. Part I. Philosophy of voice therapy and LAX VOX – theoretical descriptions. PEVOC-konferenssin abstrakti. 2009.
- Simberg S, Laine A. The resonance tube method in voice therapy: Description and practical implementations. *Logopedics Phoniatrics Vocology*. 2007; 32: 165–170.
- Simberg S, Sala E, Tuomainen J, Sellman J, R nnemaa A-M. The effectiveness of group therapy for students with mild voice disorders: A controlled clinical trial. *Journal of Voice*. 2006; 20: 97–109.

Skandalakis J, Colborn g. Skandalaki's Surgical Anatomy: the embryologic and anatomic basis of modern surgery. McGraw-Hill Companies Inc. 2006.

[http://web.uni-plovdiv.bg/stu1104541018/docs/res/skandalakis%27%20surgical%20anatomy%20-%202004/Chapter%2005\\_%20Larynx.htm](http://web.uni-plovdiv.bg/stu1104541018/docs/res/skandalakis%27%20surgical%20anatomy%20-%202004/Chapter%2005_%20Larynx.htm), viitattu 25.5.2013.

Sodersten M., Lindestad P. Glottal closure and perceived breathiness during phonation in normally speaking subjects. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1990; 33: 601–611.

Sovijärvi A. Nya metoder vid behandling av röstrubbningar. *Nordisk Tidskrift for Tale og Stemme*. 1969; 3: 121–131.

Spiess G. Kurze Anleitung zur Erlernung einer richtigen Tonbildung in Sprache und Gesang. *Frankfurt am Main: Verlag von Johannes Alt*. Aufl. 2. 1904.

Story B. Synergistic modes of vocal tract articulation for American English vowels. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2005; 118: 3834–3859.

Story B. Vocal tract area functions from magnetic resonance imaging. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1996; 100: 537–554.

Story B, Laukkanen A-M, Titze I. Acoustic impedance of an artificially lengthened and constricted vocal tract. *Journal of Voice*. 2000; 14: 455–469.

Sundberg J. Articulatory interpretation of the singing formant. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1974; 55: 838–844.

Sundberg, J. The science of the singing voice. Dekalb, Illinois: Northern Illinois University Press. 1988.

Sundberg J, Gauffin J. Waveform and spectrum of the glottal voice source. *Department for Speech, Music and Hearing. Quarterly Progress and Status Report. STL-QPSR*. 1978; 19: 35–50.

Sundberg, J, Thalén M. What is "Twang"? *Journal of Voice*. 2010; 24: 654–660.

Titze I. The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1988a; 83: 1536–1552.

Titze, I. Regulation of vocal power and efficiency by subglottal pressure and glottal width. Teoksessa Fujimura (toim.). Vocal fold physiology, volume 2. Vocal physiology: voice production, mechanisms and functions. Raven Press: New York. 1988b: 227–238.

- Titze I. Physiologic and acoustic differences between male and female voices. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1989; 85: 1699–1707.
- Titze I. Interpretation of the electroglottographic signal. *Journal of Voice*. 1990; 4: 1–9.
- Titze I. Principles of voice production. 2. painos. Iowa City: National Center for Voice and Speech. 2000.
- Titze I. Acoustic interpretation of resonant voice. *Journal of Voice*. 2001; 15: 519–28.
- Titze I. How to use the flow-resistant straws. *Journal of singing*. 2002; 58: 429–430.
- Titze I. A theoretical study of F0-F1 interaction with application to resonant speaking and singing voice. *Journal of Voice*. 2004; 18: 292–298.
- Titze I. Theoretical analysis of maximum flow declination rate versus maximum area declination rate in phonation. *Journal of Speech Language & Hearing Research*. 2006a; 49: 439–447.
- Titze I. Voice training and therapy with a semi-occluded vocal tract: rationale and scientific underpinnings. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2006b; 49: 448–459.
- Titze I. Nonlinear source–filter coupling in phonation: Theory. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2008; 123: 2733–2749.
- Titze I, Finnegan E, Laukkanen A-M, Jaiswal S. Raising lung pressure and pitch in vocal warm-ups: the use of flow-resistant straws. *Journal of Singing*. 2002; 58: 329–338.
- Titze I, Laukkanen A-M. Can vocal economy in phonation be increased with an artificially lengthened vocal tract? A computer modeling study. *Logopedics Phoniatrics Vocology*. 2007; 32: 147–156.
- Titze I, Story B. Acoustic interactions of the voice source with the lower vocal tract. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1997; 101: 2234–2243.
- Titze I, Verdolini Abbott K. Vocology – the science and practice of voice habilitation. Salt Lake City, Utah: National Center for Voice and Speech. 2012.
- Traser L, Burdumy M, Richter B, Vicar M, Echternach M. The Effect of Supine and Upright Position on Vocal Tract Configurations During Singing—A Comparative Study in Professional Tenors. *Journal of Voice*. 2013; 27: 141–148.

Vampola T, Laukkanen A-M, Horáček J, Švec J. Vocal tract changes caused by phonation into a tube: A case study using computer tomography and finite-element modeling. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2011; 129: 310–315.

Verdolini K, Druker D, Palmer P, Samawi H. Laryngeal adduction in resonant voice. *Journal of Voice*. 1998; 12: 315–327.

Yanagisawa E, Estill J, Kmucha S, Leder S. The contribution of aryepiglottic constriction to “ringing” voice quality—a videolaryngoscopic study with acoustic analysis. *Journal of Voice*. 1989; 3: 342–350.